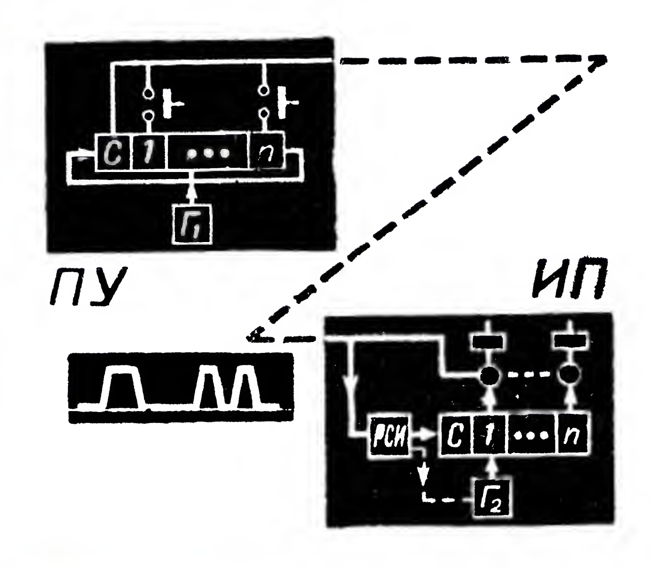
Библиотека по автоматике

В. С. Малов

ТЕЛЕМЕХАНИКА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ

Выпуск 123

В. С. МАЛОВ

ТЕЛЕМЕХАНИКА

Издание второе, дополненное и переработанное



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.398
М 18

В книге в краткой форме изложены основные принципы телемеханики и способы построения телемеханических систем (систем телеуправления, телесигнализации и телеизмерения).

Книга рассчитана на широкий круг лиц, интересующихся телемеханикой, в особенности на инженеров, не имеющих специальной подготовки в области телемеханики.

Малов Владимир Сергеевич

Телемеханика

(издание второе), М.—Л., издательство „Энергия", 1965, 96 с. с черт.
(Библиотека по автоматике, вып. 123).
Тематический план 1965 г., № 232

Редактор *Б. Я. Жуховицкий* Техн. редактор *Т. Н. Царева*

Сдано в набор 29/X 1964 г. Подписано к печати 5/I 1965 г.
Бумага 84×108¹/₃₂ Печ. л. 4,92 Уч.-изд. л. 6,08
Т-01607 Тираж 21 000 экз. Цена 30 коп. Зак. 1641

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

При управлении производственными процессами возникает задача передачи информации. Под информацией условимся понимать сведения о состоянии и режиме работы объекта и команды.

Расстояния между объектами и пунктом управления во многих случаях оказываются столь значительными, что для передачи информации необходимо применять специальные системы. К числу таких систем относятся системы телемеханики. Особенностью современных систем телемеханики является частичная или полная автоматизация процессов получения, передачи и воспроизведения (использования) информации. Это свойство систем телемеханики приобретает исключительное значение в случае передачи информации для автоматического управления.

Телемеханика находит применение в энергетике, промышленности, на транспорте, в коммунальном хозяйстве и в ряде других отраслей народного хозяйства.

В энергетике при помощи средств телемеханики осуществляются диспетчерский контроль и управление работой электростанций и подстанций, входящих в состав энергетических систем.

На нефтяных и газовых промыслах телемеханика широко применяется для целей диспетчерского управления. Средства телемеханики применяются также для контроля работы магистральных газопроводов и нефтепроводов. Непрерывно расширяется использование телемеханики в энергохозяйствах крупных предприятий. Средства телемеханики служат для диспетчерской централизации железных дорог; на электрифицированных железных дорогах применяется телеуправление автоматизированными тяговыми подстанциями. Телемеханика применяется для управления поточно-транспортными системами, централизованного управления наружным освещением городов, управления насосными станциями водопровода и регуляторными станциями газовых сетей.

Эта небольшая по объему книга знакомит читателей с основными идеями и важнейшими положениями теории и техники телемеханики. Поэтому книга не содержит систематизированных описаний конкретных средств телеуправления и телеизмерения; отдельные схемы и конструкции приводятся только для иллюстрации рассматриваемых принципов. Более подробные сведения читатель может найти в библиографии, приведенной в конце книги.

Настоящая книга выпускается вторым изданием. Общая структура первого издания сохранена, так же как и значительная часть текста. Вместе с тем внесены дополнения, учитывающие развитие телемеханики за последние годы, и, в частности, включена новая глава, в которой содержатся сведения о некоторых современных комбинированных и комплексных телемеханических системах.

Глава первая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

1-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Телемеханикой называют область техники и научную дисциплину, охватывающую теорию и технические средства преобразования и передачи на расстояние информации для управления производственными процессами при частичной или полной автоматизации процессов получения, передачи, приема и использования этой информации.

Существует, как известно, много видов систем передачи информации. К ним относятся, в частности, системы телефонной связи и телеграфирования, радиовещания, телевидения и т. п. Методы технического осуществления таких систем и систем телемеханики во многом сходны, что позволяет объединить их в общий класс систем передачи информации по проводным или беспроволочным линиям связи.

Телемеханические системы дополняют системы автоматики в решении общей задачи управления производственными процессами. Заметим, что термин *производственный процесс* здесь следует понимать в самом общем смысле: имеются в виду как технологические процессы на заводах, фабриках и электростанциях, так и рабочие процессы движения поездов на железнодорожном транспорте, полетов самолетов и ракет и т. п.

Обычно телемеханические системы выполняют следующие функции:

а) контроль на расстоянии за технологическим процессом;

б) вмешательство на расстоянии в работу производственных установок, в частности путем изменения задания местным устройствам автоматики;

в) координация работы (подчинение одному закону) разделенных расстоянием автоматизированных производственных установок, являющихся частью общей автоматизированной системы.

Дальнейшим развитием последней функции является применение телемеханики совместно с управляющей вычислительной машиной. В этом случае системы телемеханики становятся органической частью системы автоматического управления. Системы телемеханики

вводят в управляющую машину, находящуюся в центральном пункте управления, информацию о ходе технологических процессов на отдельных установках и передают этим установкам команды, которые вырабатывает управляющая машина.

Самой главной задачей систем телемеханики является преодоление затруднений, связанных с передачей информации на большие расстояния. Особенно важно обеспечить достаточную надежность передачи информации при максимальных затратах на сооружение и эксплуатацию линий связи, по которым передается информация. Таким образом, в основе выбора вида телемеханической системы заложены как технические факторы (надежность), так и экономические (затраты на сооружение линии связи). Длина линии связи не служит единственным критерием оценки целесообразности применения в данных условиях телемеханической системы вообще или выбора определенной системы из нескольких возможных. Применение средств телемеханики может оказаться целесообразным даже при весьма незначительных расстояниях.

Телемеханические системы могут обслуживать как неподвижные, так и подвижные объекты. К первой категории (неподвижные объекты) относится бо́льшая часть сооружений на заводах и электростанциях, нефтяных и газовых промыслах, в коммунальном хозяйстве; к числу подвижных объектов относятся прежде всего транспортные средства (корабли, локомотивы, краны) и летательные аппараты (самолеты, ракеты, космические корабли и т. п.). В этой книге основное внимание будет уделено наиболее широко распространенным в промышленности системам с неподвижными объектами.

Неподвижные объекты телемеханического управления и контроля могут быть либо собраны в одном или немногих пунктах (производственных сооружениях), либо разбросаны поодиночке или небольшими группами по всей территории предприятия. Телемеханическую систему, обслуживающую объекты первого типа, называют системой *со сосредоточенными объектами;* система второго типа называется системой *с рассредоточенными объектами.*

Сосредоточенные объекты характерны, например, для электростанций и подстанций; на каждой из них размещается значительное число (несколько десятков) объектов контроля и управления (выключателей отходящих линий, трансформаторов, генераторов и т. п.). В этом случае телеуправление и телеконтроль осуществляются *с диспетчерского пункта,* с которым электростанция (подстанция) обычно соединяется прямой линией связи. В пределах одной установки связь осуществляется без применения средств телемеханики.

Примером системы с рассредоточенными объектами может служить система телеуправления насосными установками на нефтепромыслах. Каждая из многочисленных насосных установок, находящихся на территории промысла, является отдельным *исполнительным пунктом.* Телемеханическая система обслуживает большую группу таких исполнительных пунктов.

На рис. 1 показаны характерные структуры линий связи для телемеханических систем обоих типов — система со сосредоточенными объектами (рис. 1,*а*) и различные системы с рассредоточенными объектами: радиальная (рис. 1,*б*), цепочечная (рис. 1,*в*) и наиболее общая древовидная структура (рис. 1,*г*). Применяются также системы со смешанной структурой.

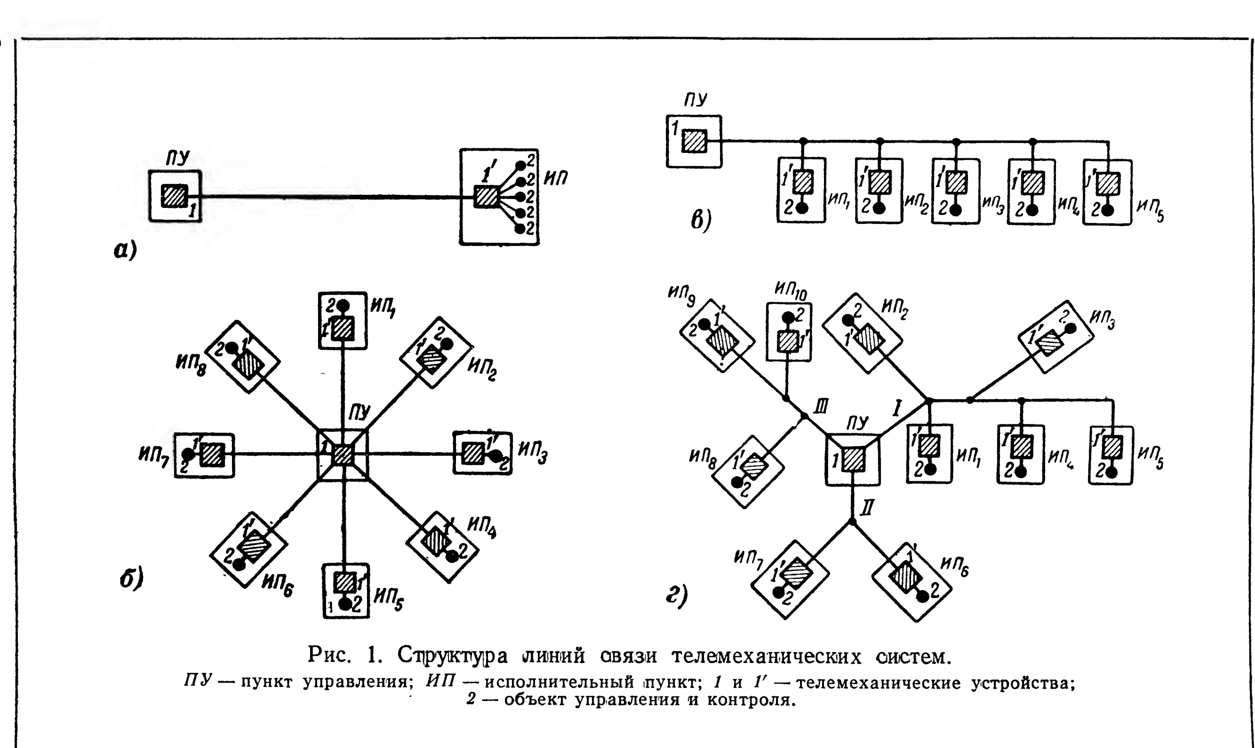


Рис. 1. Структура линий связи телемеханических систем.

ПУ — пункт управления; *ИП* — исполнительный пункт; *1* и *1'* — телемеханические устройства; *2* — объект управления и контроля.

Всю информацию, передаваемую телемеханическими системами, можно разделить на два типа.

Первый тип информации — *непрерывные* сообщения, например при телепередаче непрерывных значений физических величин (тока, мощности, давления и расхода жидкости или газа и т. п.). Второй тип информации — *дискретные* сообщения, т. е. передача конечного (обычно относительно небольшого) числа сообщений. К дискретным сообщениям относятся позиционные или предельные извещения о состоянии контролируемых объектов (например, «включено-отключено», «открыто-закрыто», «выше нормы-ниже нормы» и т. п.). Дискретные сообщения обычны и при передаче позиционных команд (например, «включить-отключить», «открыть-закрыть»). Однако передаются и непрерывные команды (например, задание курса, изменение положения механизма и т. п.). Тогда применяются непрерывные сообщения, как и при передаче непрерывных значений физических величин.

Как будет показано ниже, характер сообщений (непрерывные или дискретные) в значительной мере определяет специфику телемеханических систем.

По выполняемым функциям системы телемеханики можно подразделить следующим образом:

1. *Системы телеизмерения* — осуществляют передачу непрерывных значений измеряемых величин для наблюдения за этими величинами или регистрации их или для ввода данных в автоматические устройства.

2. *Системы телесигнализации* — передают различного рода дискретные сообщения о ходе производственных процессов: сигналы о достижении контролируемыми параметрами предельных значений, возникновении аварийного состояния, вводе в действие и выводе из работы технологического оборудования.

Системы телеизмерения и телесигнализации называют системами телеконтроля.

3. *Системы телеуправления* — применяются для передачи команд управления производственными установками: включения и отключения оборудования, изменения нагрузки, регулирования подачи жидкостей и газов, изменения скорости и курса движения и т. п. В зависимости от характера команд передаваемые сообщения могут быть как непрерывными (например, плавное изменение нагрузки), так и дискретными (например, включение или отключение оборудования). В промышленных системах телеуправления в большинстве случаев применяется передача дискретных сообщений.

1-2. ИНФОРМАЦИЯ И СИСТЕМЫ ЕЕ ПЕРЕДАЧИ

В последние годы создана и развивается новая теоретическая дисциплина — *теория информации*. Теория информации уделяет основное внимание вопросам преобразования информации и передачи ее по линии связи. Математическим аппаратом теории информации являются теория вероятностей и математическая статистика.

Приложение теории информации к рассматриваемой здесь разновидности систем передачи информации — системам телемеханики — оказывается удобным для анализа многих свойств последних. Но изложение содержания теории информации выходит за пределы про-

граммы данной книги. Тем не менее приведены некоторые важные положения этой теории, необходимые для рассмотрения систем телемеханики.

Согласно теории информации система передачи информации состоит из следующих элементов (рис. 2): передатчика, преобразующего сообщение в сигнал; линии связи, по которой передается сигнал; приемника, вновь преобразующего сигнал в сообщение. Сообщение поступает в передатчик от источника сообщений. Приемник выдает информацию получателю сообщений.

Конечная цель системы заключается в передаче сообщения от источника к получателю. Цель эту надо считать достигнутой, если принятое получателем сообщение *B* точно соответствует переданному сообщению *A*. Однако система передачи информации находится под воздействием помех (шумов), которые могут исказить передаваемые по линии связи сигналы, и сообщение может быть принято получателем с искажением.

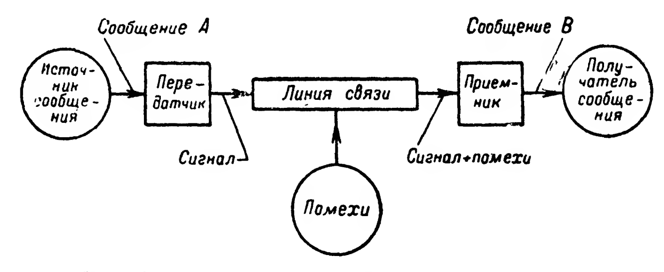


Рис. 2. Схема системы передачи информации.

Уточним понятия, применяемые при описании системы передачи информации. Под *сообщением* подразумевается все то, что подлежит передаче (поступает на вход передатчика или создается на выходе приемника).

Сигналом называется физический процесс (например, определенная последовательность электрических импульсов или электрические колебания определенных частот), однозначно соответствующий данному сообщению. Для передачи сигналов передатчик и приемник соединяются линией связи. Последней может служить проводная цепь или радиолиния. По линии связи часто передается одновременно несколько сообщений, т. е. несколько сигналов передается от группы передатчиков к соответствующим им приемникам (многократная передача сигналов). Совокупность технических средств, обеспечивающих независимую передачу сообщения, называют *каналом связи.* Таким образом, многократная передача сигналов по линии связи означает, что на данной линии связи образовано несколько каналов связи (многоканальная связь).

Под *помехами* (шумами) подразумеваются любые искажающие сигнал электрические воздействия, возникающие в процессе передачи сообщения. На схеме рис. 2 условно показано, что помехи действуют в линии связи. В реальных системах мешающие воздействия могут возникать также в передатчиках и приемниках (аппаратурные помехи).

Установим также понятие информации. Понятия информации и сообщения не тождественны. К *информации* относятся только содержащиеся в сообщении сведения, которые были ранее неизвестны получателю.

В качестве примера системы передачи информации рассмотрим систему телеграфирования по проводам. Здесь источником сообщения является отправитель телеграммы, а сообщением — текст телеграммы. Очевидно, что не весь текст телеграммы содержит сведения, неизвестные адресату — получателю сообщения; распространенная количественная оценка телеграммы как сообщения по числу слов отнюдь не будет характеризовать содержащуюся в ней информацию.

Передатчиком сигналов в системе телеграфирования служит передающий телеграфный аппарат, посылающий электрические сигналы по условному проводу, по которому каждой букве или цифре текста соответствует определенный электрический сигнал (комбинация разнополярных или однополярных импульсов). Сигналы передаются по проводной линии связи, причем линия связи многократно уплотняется, т. е. одновременно передаются сигналы от нескольких телеграфных аппаратов к соответствующим приемным аппаратам. Телеграфный аппарат-приемник, установленный на другом конце линии связи, расшифровывает принимаемые сигналы и печатает текст телеграммы на ленте или бланке, воспроизводя первоначальное сообщение. Этот текст и поступает к адресату — получателю сообщения.

Нередко в принятом тексте телеграммы обнаруживаются искажения, порожденные действием помех. Последние могут возникнуть как в результате мешающих влияний в канале связи (атмосферные помехи или помехи от влияния других каналов связи данной линии или соседних линий связи), так и за счет нечеткого действия передающего или приемного телеграфных аппаратов (аппаратурные помехи). Искаженное сообщение, естественно, содержит меньше информации, чем первоначальное сообщение.

Разобранный здесь пример поясняет, как реализуется схема системы передачи информации (рис. 2).

Теория информации позволяет решать две основные задачи, связанные с передачей сообщений:

а) определять степень использования возможностей сигнала и пропускной способности канала связи, т. е. *эффективности* передачи сообщений;

б) устанавливать целесообразную систему сигналов с точки зрения минимальной вероятности искажения помехой, т. е. обеспечения *помехоустойчивости* передачи сообщений.

Для теории информации, как уже было сказано, характерны подход к решению этих задач с позиций теории вероятностей и математической статистики и стремление дать количественную математическую оценку системы и передаваемой ею информации. Поэтому к важнейшим показателям системы передачи информации относится *количество информации*. Введение такого показателя позволяет однозначно оценить передаваемую информацию независимо от ее характера и природы.

В основе определения количества информации, подаваемой на вход системы, лежит оценка вероятности возникновения данного сообщения. Если общее число различных сообщений равно N и возникновение любого из этого числа сообщений равновероятно, то

вероятность возникновения данного сообщения будет обратно пропорциональна общему числу возможных сообщений:

$$p_с = \frac{1}{N}.$$

Чем меньше вероятность возникновения данного сообщения $p_с$, тем больше информации несет сообщение. В качестве меры количества информации принимают логарифм обратной вероятности

$$I = \log_a \frac{1}{p_с} = - \log_a p_с = \log_a N.$$

Пусть каждое из N сообщений передается в виде условной комбинации n знаков (символов) или, иначе говоря, элементов сообщения. При постоянном числе элементов сообщения n можно составить N различных комбинаций, если каждый из n элементов получает одно из нескольких возможных различных состояний. Пусть число этих состояний есть m и вероятности появления любого из m состояний одинаковы. Тогда общее число возможных сообщений

$$N = m^n.$$

В этом случае согласно предыдущему количество информации

$$I = \log_a N = n \log_a m.$$

Такая оценка удобна тем, что количество информации I и число элементов сообщения n связываются пропорциональной зависимостью.

Выбор основания логарифма a в принципе безразличен. Обычно принимают $a=2$, так как в этом случае единицей количества информации служит информация в сообщении, содержащем всего один элемент ($n=1$), который может принимать два противоположных состояния типа «да—нет» ($m=2$):

$$I = n \log_2 m = \log_2 2 = 1.$$

Количество информации при этом исчисляется в двоичных единицах:

$$I = n \log_2 m \ [\text{дв. ед}].$$

Это соотношение справедливо только при равновероятности всех m возможных соостояний элемента сообщения. В более общем случае, когда вероятности этих m состояний соответственно

$$p_1, p_2, p_3, \ldots, p_i, \ldots, p_m,$$

количество информации определяется формулой

$$I = - n \sum_{i=1}^{m} p_i \log_2 p_i.$$

Нетрудно показать, что формула

$$I = n \log_2 m$$

представляет собой частный случай общей формулы для количества информации при

$$p_1 = p_2 = p_3 = \ldots = p_i = \ldots = p_m = \frac{1}{m}.$$

Действительно, при этом

$$I = -n \sum_{i=1}^{m} p_i \log_2 p_i = -nm\left(\frac{1}{m} \log_2 \frac{1}{m}\right) = n \log_2 m .$$

Такое определение понятия информации характеризует количество информации как степень неопределенности данного сообщения до того, как сообщение получено. Очевидно, что наибольшая неопределенность будет тогда, когда все возможные состояния элементов сообщения будут иметь равные вероятности появления.

Проиллюстрируем это примером. Пусть все возможные сообщения передаются сигналами одинаковой длины, составленными из семи элементов, причем число возможных состояний равно ($n=7$; $m=2$).

Определим количество информаций в двух случаях.

а) Вероятности обоих состояний элементов равны:

$$p_1 = p_2 = \frac{1}{2}.$$

б) Вероятность появления одного состояния в 3 раза больше, чем другого:

$$p_1 = \frac{3}{4};\ p_2 = \frac{1}{4}.$$

В случае „а"

$$I = 7 \log_2 2 = 7\ \textit{дв.ед.}$$

В случае „б"

$$I = -7\left(\frac{3}{4} \log_2 \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \log \frac{1}{4}\right) = -7\left(\frac{3}{4}\log_2 3 - \frac{3}{4}\log_2 4 - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{4} \log_2 4\right) = -7\left(\frac{3}{4}\cdot 1{,}585 - \frac{3}{4}\cdot 2 - \frac{1}{4}\cdot 2\right) = 5{,}67\ \textit{дв. ед.}$$

Таким образом, во втором случае количество информации, как и следовало ожидать, меньше, чем в первом.

Приведенные здесь формулы количества информации можно применять не только при конечном числе N возможных сообщений, но и при непрерывных сообщениях. Непрерывное сообщение нужно, например, передавать при дистанционных измерениях какой-либо физической величины x (тока, напряжения, давления жидкости или газа, уровня жидкости и т. п.); в этом случае число значений измеряемой величины не ограничено. Однако практически достаточно передавать конечное число значений. Действительно, система измере-

ния обладает некоторой «разрешающей способностью», мерой которой служит погрешность измерения Δx. Следовательно, можно ограничиться передачей значений измеряемой величины, отличающихся друг от друга на интервалы Δx (рис. 3), т. е. заменить непрерывный ряд значений величины x конечным числом значений N

$$N = \frac{x_{\text{макс}} - x_{\text{мин}}}{\Delta x}.$$

Такой процесс называют *квантованием* по уровню, а интервал Δx — шагом квантования. Количество информации квантованной функции может быть определено так же, как и при дискретных сообщениях.

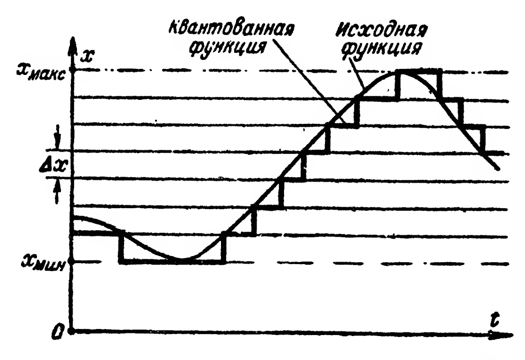


Рис. 3. График процесса квантования сообщения по уровню.

Для характеристики сигнала, передаваемого по каналу связи, иногда используется понятие объема сигнала. Объем сигнала V равен произведению трех параметров («координат») сигнала: полосы частот F, требуемой для передачи сигнала, времени передачи сигнала T и превышения H мощности сигнала $P_{\text{с}}$ над мощностью помех $P_{\text{п}}$:

$$V = FTH,$$

где

$$H = \log_2 \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{п}}}.$$

Следует заметить, что в большинстве случаев сигналы теоретически должны обладать неограниченным спектром частот (например, непериодические импульсные посылки, периодические последовательности импульсов, частотно-модулированные колебания). Однако полоса частот сигналов, передаваемых по каналу связи, всегда ограничивается. Обычно для этой цели на входе канала связи включается фильтр, пропускающий лишь определенную полосу частот F. При этом полоса частот F выбирается так, чтобы искажения сигналов из-за ограничения ширины полосы не превышали допустимых. Например, при передаче отдельных импульсов, если на приемном конце

канала связи требуется только отметить наличие импульсов, спектр сигнала может быть ограничен частотой

$$F = \frac{1}{t_{\text{мин}}},$$

где $t_{\text{мин}}$ — продолжительность самого короткого импульса.

Рассмотрим пример определения объема сигнала. Пусть передается непериодическая последовательность импульсов, представленная на рис. 4; $t_{\text{и}1} = 4$ *мсек*; $t_{\text{и}2}=20$ *мсек*; $t_{\text{п}1}=5$ *мсек*; $t_{\text{п}2}=18$ *мсек*.

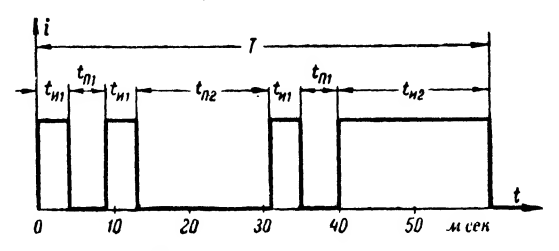


Рис. 4. График сигнала.

Мощность сигнала в 5 раз превышает мощность помех, возникающих в канале связи.

Определим „координаты" сигнала. Спектр сигнала должен быть ограничен частотой

$$F = \frac{1}{t_{\text{и}1}} = \frac{10^3}{4} = 250 \text{ гц}.$$

Время передачи сигнала и превышение

$$T = 3t_{\text{и}1} + 2t_{\text{п}1} + t_{\text{и}2} + t_{\text{п}2} = 3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + $$
$$+ 20 \cdot 10^{-3} + 18 \cdot 10^{-3} = 0{,}06 \text{ сек}$$

$$H = \log_2 \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{п}}} = \log_2 5 = 2{,}32.$$

Объем сигнала

$$V = 250 \cdot 0{,}06 \cdot 2{,}32 = 34{,}8.$$

Подобным образом определяется и емкость канала $V_{\text{к}}$:

$$V_{\text{к}} = F_{\text{к}} T_{\text{к}} H_{\text{к}};$$

здесь $F_{\text{к}}$ — полоса частот, пропускаемых каналом;

$T_{\text{к}}$ — время, на которое канал предоставляется для передачи сигнала.

При определении $H_{\text{к}}$ учитываются максимальная мощность сигнала $P_{\text{к}}$, которую может пропустить канал, и мощность помех в канале.

Для передачи сигнала по каналу необходимо выполнение условия $V_к \geqslant V_c$. Однако это условие не всегда достаточно для передачи сигналов, например если полоса частот, пропускаемых каналом, меньше наибольшей частоты спектра сигнала ($F_к < F$), а также при $T_к < T$ или $H_к < H$.

Таким образом, достаточными условиями являются:

$$F_к \geqslant F;\ T_к \geqslant T;\ H_к \geqslant H.$$

Если необходимое условие соблюдено ($V_к \geqslant V$), а достаточные не все выполняются, то передача сигнала может быть обеспечена после преобразования сигнала.

Например пусть требуется передать рассмотренный выше сигнал (рис. 4) по каналу со следующими характеристиками:

$$F_к = 100\ гц;\ T_к = 1\ сек;\ \frac{P_к}{P_п} = 10.$$

При этом $V_к = 100 \cdot 1 \cdot \lg_2 10 = 322$, что значительно превышает объем сигнала ($V = 34{,}8$). Однако условие $F_к \geqslant F$ не соблюдено ($F_к = 100$ *гц*; $F = 250$ *гц*).

Для того чтобы сигнал можно было передать по каналу, достаточно увеличить продолжительность всех элементов сигнала пропорционально $\frac{F}{F_к} = \frac{250}{100} = 2{,}5$, т. е. выбрать $t_{и1} = 10$ *мсек*, $t_{и2} = 50$ *мсек*, $t_{п1} = 12{,}5$ *мсек*, $t_{п2} = 45$ *мсек*; при этом $F = \frac{10^3}{10} = 100$ *гц* $= F_к$, а объем сигнала не изменился.

Таким образом, одним из способов преобразования сигнала является варьирование F и T при неизменном произведении их. Преобразование сигнала по уровню для восстановления условия $F_к \geqslant F$ или $T_к \geqslant T$ может быть выполнено лишь в немногих случаях.

В теории информации вводится еще один количественный показатель системы передачи информации — *пропускная способность* системы или максимальная скорость передачи информации.

Пропускная способность

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_п}\right).$$

Формула определяет максимальную пропускную способность системы, или максимальное количество информации, которое можно передать в единицу времени. Как показывает формула, с увеличением отношения $P_c/P_п$ пропускная способность C увеличивается.

Следует пояснить также понятие *избыточности*, с которым придется оперировать в дальнейшем при рассмотрении телемеханических сигналов. Как уже было отмечено, количество информации, содержащееся в сообщении определенной длины, в зависимости от характера сообщения может быть различным. Иначе говоря, количество информации, приходящееся на один элемент сообщения, не остается постоянным для всех видов сообщений. Максимальное количество инфор-

мации на элемент содержит сообщение, число элементов которого n_0 определяется из формулы

$$I = n_0 \log_2 m \left(p_1 = p_2 = \ldots = p_i = \ldots = p_m = \frac{1}{m} \right).$$

Увеличение „длины" сообщения n по сравнению с n_0 характеризует избыточность сообщения:

$$U = \frac{n - n_0}{n_0}.$$

Избыточность хотя и удлиняет сообщение, может быть полезна для повышения помехоустойчивости системы передачи информации, так как она помогает восстановить содержание сообщения при искажении сигнала помехой (подробнее см. гл. 2). Здесь в качестве примера использования избыточности можно указать на известный способ передачи сообщений с повторением сигналов. Очевидно, что такой способ повышает надежность передачи сообщения, так как вероятность повторных однотипных искажений сигнала относительно мала.

Уточним понятие помехоустойчивости. При передаче сигнала по каналу связи действие помех определенной критической интенсивности вызывает ошибку в расшифровке сигнала приемником. Критическая интенсивность помех, обычно оцениваемая по отношению к интенсивности сигнала, зависит от вида сигнала, характера помех и способа приема сигнала.

Помехи могут быть весьма разнообразными по своим характеристикам. Однако принято различать три основных типа помех: а) синусоидальные; б) импульсные; в) флуктуационные.

Синусоидальные помехи имеют вид синусоидальных колебаний (одночастотных) или суммы конечного числа синусоидальных колебаний разных частот.

Импульсные помехи (рис. 5,*а*) представляют собой последовательность импульсов произвольной формы со случайными амплитудой, длительностью и моментом возникновения импульса. При этом промежуток между отдельными импульсами столь значителен, что переходный процесс в системе передачи информации, вызванный возникновением очередного импульса, затухает до момента появления следующего импульса.

Флуктуационные помехи также носят случайный характер, но в отличие от импульсных помех воздействия от импульсов в большом количестве накладываются друг на друга, вследствие чего кривая напряжения помех получается непрерывной (рис. 5,*б*). Флуктуационные помехи называют также «гладкими». Следует заметить, что различие импульсных и флуктуационных помех в значительной степени определяется шириной полосы пропускания системы связи, в которой действуют помехи: при сокращении полосы пропускания импульсные помехи трансформируются во флуктуационные.

Часто при оценке действия помех оперируют понятием нормальных флуктуационных помех или гладких помех типа «белого шума». Для «белого шума» характерно распределение мгновенных значений напряжения по так называемому нормальному или Гауссовскому

закону: чем выше мгновенное значение напряжения, тем ниже вероятность его появления. Спектр «белого шума» теоретически равномерен в неограниченном диапазоне частот. При этом напряжение помехи связывается с полосой пропускания ΔF системы, в которой действует шум, простым соотношением:

$$u_п = k\sqrt{\Delta F}.$$

В реальных условиях флуктуационные помехи отличаются от «белого шума», но простота математического описания воздействия «белого шума» делает целесообразным применение характеристик таких идеализированных помех при теоретических расчетах помехоустойчивости.

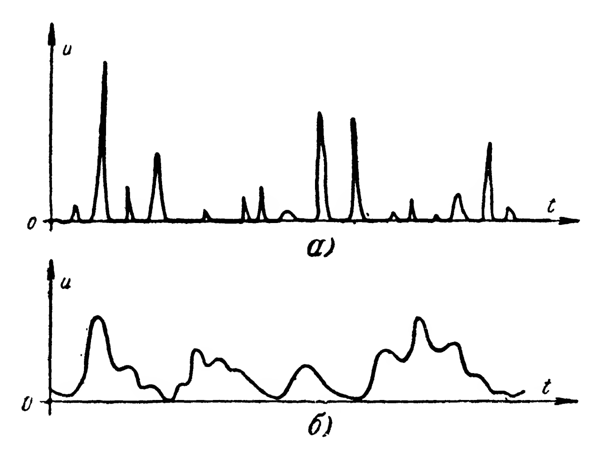


Рис. 5. Типы помех.
а — импульсные; *б* — флуктуационные.

Для случайных помех мерой помехоустойчивости при передаче дискретных сообщений может служить вероятность или средняя частота появления ошибки или отказа. При данной средней мощности помехи вероятность появления ошибки зависит от статистической характеристики помехи.

Для примера рассмотрим действие помех двух типов на импульсный сигнал (рис. 6,*а*). Первый тип помехи — одночастотное синусоидальное напряжение, причем частота помехи соизмерима с частотой следования импульсов. Так как амплитуда помехи $U_{пm}$ постоянна, то существует 100-процентная вероятность того, что сигнал не будет разрушен, если $U_{пm}<U_0/2$ (рис. 6,*б*) и, напротив, что при $U_{пm}>U_0/2$ обычные методы приема не дадут возможности восстановить первоначальный сигнал. Таким образом, критическим будет соотношение $U_{пm}/U_0=1/2$.

Второй тип помехи— «белый шум». В этом случае помехоустойчивость передачи сигнала может быть оценена вероятностью $p(u_п \geqslant U_0/2)$

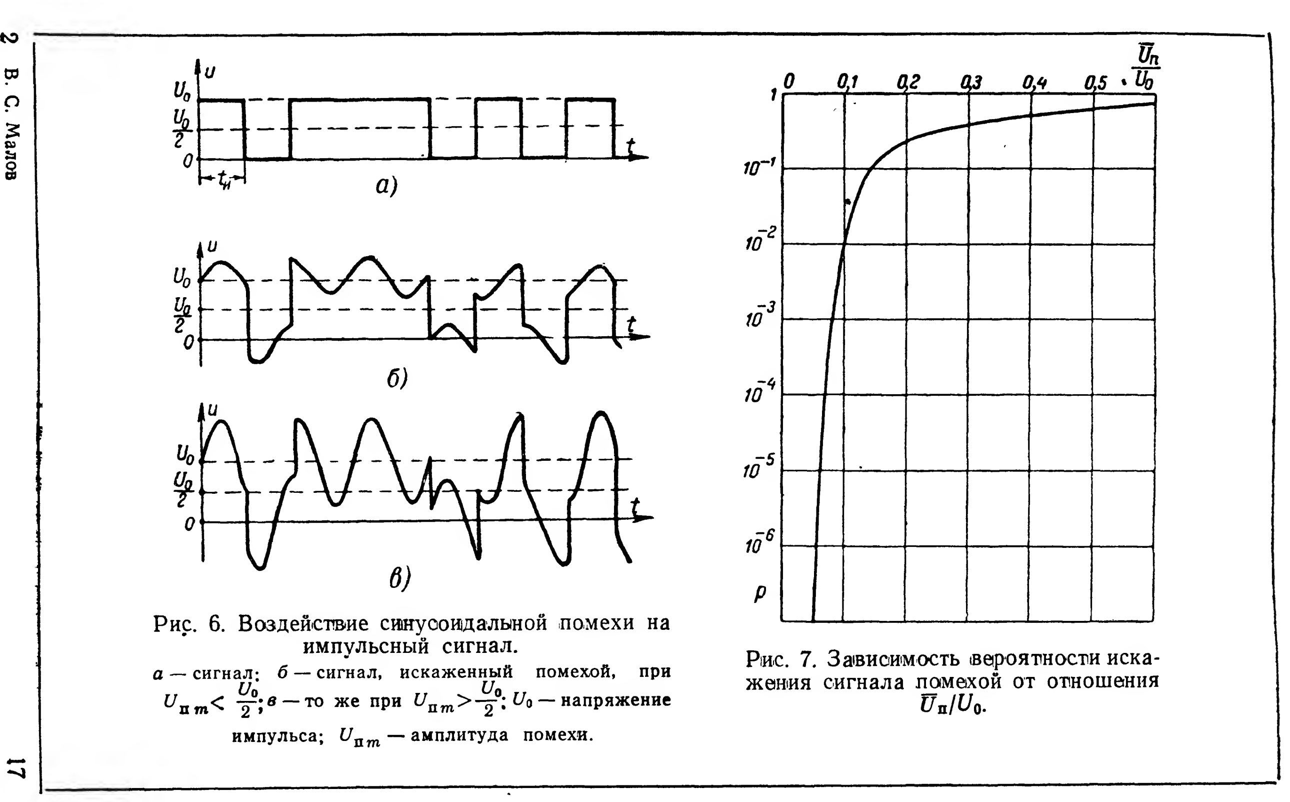


Рис. 6. Воздействие синусоидальной помехи на импульсный сигнал.

а — сигнал; *б* — сигнал, искаженный помехой, при $U_{\text{п}m} < \frac{U_0}{2}$; *в* — то же при $U_{\text{п}m} > \frac{U_0}{2}$; U_0 — напряжение импульса; $U_{\text{п}m}$ — амплитуда помехи.

Рис. 7. Зависимость вероятности искажения сигнала помехой от отношения $\overline{U}_{\text{п}}/U_0$.

превышения мгновенного значения помехи $u_п$ критического уровня $U_0/2$:

$$p\left(u_п \geqslant \frac{U_0}{2}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\,\overline{U}_п} \int\limits_{\frac{U_0}{2}}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\cdot\frac{x^2}{\overline{U}_n^2}}\,dx,$$

где $\overline{U}_п$ — среднеквадратичное напряжение помехи.

Зависимость этой вероятности p от отношения среднеквадратичного напряжения помехи $\overline{U}_п$ к величине импульса U_0 представлена на рис. 7.

Следует иметь в виду, что помехоустойчивость системы существенно изменится, если приемник инерционен и реагирует на некоторое усредненное напряжение входа. При передаче непрерывных сообщений помехоустойчивость оценивают величиной ошибки (обычно среднеквадратичной ошибкой).

Таким образом, рассмотренные примеры подтверждают необходимость учета при оценке помехоустойчивости характера сигнала и помехи, а также способа приема. Заметим еще, что математический анализ помехоустойчивости представляет собой трудную задачу, аналитические решения которой получены лишь для наиболее характерных типов помех (в основном для синусоидальных помех и «белого шума»).

Помехоустойчивость определяет только одну, хотя и весьма важную, сторону оценки надежности действия телемеханической системы. Наряду с помехоустойчивостью необходимо учитывать также аппаратурную надежность, т. е. надежность действия аппаратуры, входящей в состав устройств и блоков системы. Поскольку неисправности отдельных элементов аппаратуры (электронных приборов, реле, элементов электрических схем и т. п.) в основном имеют случайный характер, аппаратурная надежность количественно оценивается вероятностными величинами (вероятностью безотказной работы, интенсивностью отказов или другими). Аппаратурная надежность зависит прежде всего от характеристик надежности элементов аппаратуры, количества их, структуры системы и схем взаимного включения элементов и блоков, вида и степени резервирования элементов и блоков системы.

В настоящее время уже разработаны вероятностные методы прогнозирования аппаратурной надежности.

Глава вторая

ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ

2-1. НЕПРЕРЫВНЫЕ И ДИСКРЕТНЫЕ СИГНАЛЫ

Телемеханические сообщения, как уже было сказано, могут быть как непрерывными, так и дискретными. В простейшем случае источник сообщений определяет и характер сигналов, используемых для передачи этих сообщений: дискретные сообщения передаются дискретными сигналами, а непрерывные сообщения — непрерывными сигналами.

Однако непрерывные сообщения могут быть переданы и дискретными сигналами после квантования сообщений, т. е. замены непрерывного ряда значений физической величины ограниченным числом ее значений. Таким образом, осуществляется переход к сообщениям *дискретным по уровню* (параметру сообщения), которым отвечают также дискретные сигналы. Наряду с этим, не прибегая к квантованию по уровню, можно перейти от непрерывных к *дискретным по времени* сообщениям, т. е. передавать сигналы не непрерывно, а через определенные интервалы времени[1].

Доказано, что непрерывная функция времени $u(t)$, спектр которой не содержит составляющих частот выше F_m, может быть полностью определена последовательностью ее значений, следующих через промежутки времени

$$\Delta t \leqslant \frac{1}{2F_m} \quad \text{(рис. 8).}$$

Это положение, известное под названием теоремы Котельникова или теоремы отсчетов, определяет необходимую периодичность следования сигналов. Оно устанавливает возможность точного воспроизведения функции времени, представленной неограниченным множеством дискретных во времени отсчетов. Если же ограничить интервал времени, и воспользоваться конечным числом отсчетов функции,

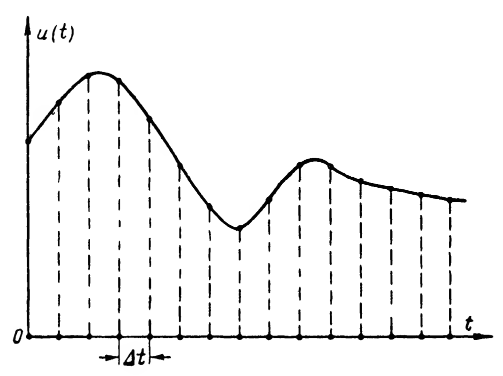


Рис. 8. Представление непрерывной функции дискретными по времени значениями.

то неизбежно возникнет ошибка. Величина ошибки возрастает с уменьшением числа отсчетов. Максимальной величины ошибка достигает, если значение функции в произвольный момент времени оценивается по единичному отсчету. Поэтому для получения удовлетворительной точности воспроизведения функции при конечном числе отсчетов потребуется существенно уменьшить Δt по сравнению с вычисленным согласно теореме Котельникова.

---

[1] Условимся, что далее понятие непрерывности или дискретности сигналов будет относиться к параметру сигнала; дискретность по времени будет оговариваться особо.

Очевидно, что дискретная во времени передача сигналов в равной степени применима как к непрерывным, так и к квантованным по уровню сообщениям.

Непрерывные сигналы. При передаче непрерывных сообщений непрерывными сигналами задача сводится к функциональному преобразованию одной величины (параметр сообщения) в другую (параметр сигнала). Цель такого преобразования состоит в замене параметра сообщения величиной, удобной для передачи по каналу связи и прежде всего наименее подверженной искажениям при изменении характеристик канала связи (главным образом затухания) и действии помех.

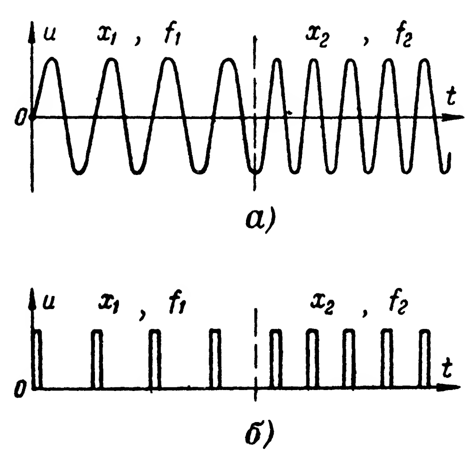


Рис. 9. Частотная модуляция.

а — синусоидальное напряжение; *б* — периодическая последовательность импульсов (частотно-импульсная модуляция).
$x_2 > x_1$; $f_2 > f_1$.

В простейших случаях в качестве параметра сигнала служит величина тока или напряжения в канале связи, а зависимость между параметром сообщения и величиной тока (напряжения) выбирается линейной. Так, например, передают на малые расстояния значения различных электрических и неэлектрических величин.

В более сложных случаях, когда требования к стабильности параметра сигнала выше (например, при передаче результатов измерения по каналам связи с сильно меняющимся затуханием), изменяющимся параметром сигнала выбирают частоту или время (длительность). В первом случае (параметр сигнала — частота) применяют передачу либо синусоидального переменного тока, либо периодической последовательности импульсов; при этом частота колебаний или частота следования импульсов устанавливается по функциональной зависимости от параметра сообщения $f = \varphi(x)$ (рис. 9).

Во втором случае (параметр сигнала — время) функцией параметра сообщения является либо продолжительность посылки (шири-

на импульса), либо смещение во времени положения (фазы) импульса:

$$t_{и} = \varphi(x).$$

На рис. 10 представлены типичные сигналы с временным параметром.

В технике связи такого рода изменения параметра сигнала называют модуляцией. В первом случае имеет место *частотная модуляция* (собственно частотная — рис. 9,*а* и частотно-импульсная — рис. 9,*б*), во втором — *время-импульсная модуляция* (широтно-импульсная — рис. 10,*а* и фазо-импульсная — рис. 10,*б*).

Частотный спектр сигналов при этих видах модуляции теоретически неограничен (см. приложение), однако для правильного воспроизведения сигнала на приемном конце достаточно передать по каналу связи только составляющие спектра, занимающие определен-

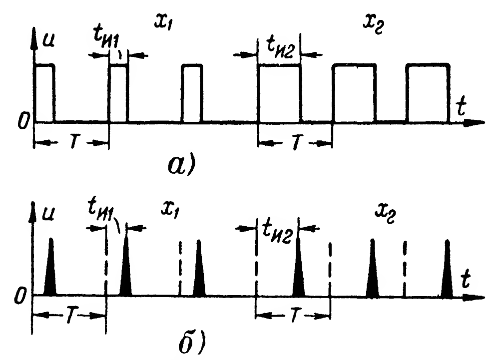


Рис. 10. Время-импульсная модуляция.
а — широтно-импульсная; *б* — фазо-импульсная.
$x_2 > x_1$; $t_{и2} > t_{и1}$.

ную полосу частот. Ширина полосы частот выбирается такой, чтобы искажения сигнала в результате ограничения частотного спектра при его расшифровке не вызывали погрешностей, превышающих допустимое значение. Например, для сигнала с временным параметром ограничение полосы частот сигнала искажает форму принимаемого импульса и, что особенно существенно, крутизну его фронтов. В результате возникает ошибка в отсчете длительности импульса. Поэтому ширина полосы частот передаваемого сигнала должна выбираться по допустимой ошибке в отсчете длительности импульса.

Дискретные сигналы. Здесь рассматриваются сигналы, дискретные по параметру, т. е. рассчитанные на передачу конечного числа возможных сообщений. Как уже было сказано, такие сигналы применяются и при дискретных, и при квантованных по уровню непрерывных сообщениях.

Задача сводится к тому, чтобы для ансамбля из N сообщений сформировать такое же число различающихся дискретных сигналов и придать каждому из сообщений определенный сигнал. Сигналы строятся в виде условных комбинаций электрических импульсов, ко-

торые носят название *кодов*. Процесс преобразования сообщений в дискретные сигналы называется *кодированием*.

Для построения комбинаций применяются электрические импульсы, различающиеся по какому-либо одному или нескольким параметрам, называемым импульсными признаками. В качестве импульсных признаков выбирают такие параметры, как величина, полярность (направление тока), время (продолжительность или фаза) импульса, частота заполнения (рис. 11).

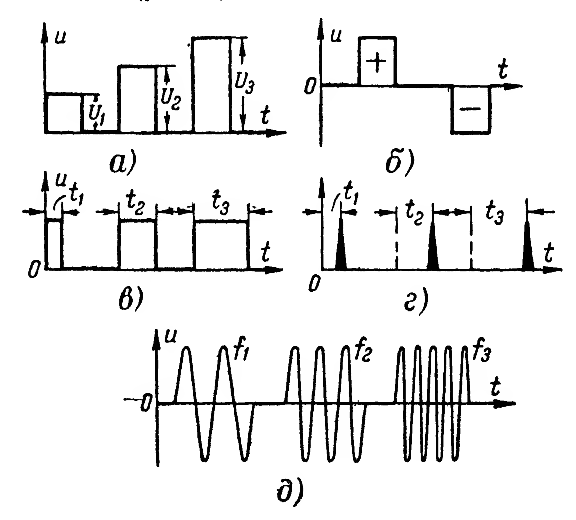


Рис. 11. Импульсные признаки.

а — величина; *б* — полярность; *в* — ширина (продолжительность); *г* — фаза; *д* — частота заполнения.

При составлении кодов используются импульсы с несколькими (m) значениями импульсных признаков. Следует заметить, что для четкости различения кодов применяют большей частью только два ($m=2$) значения параметра; исключением является частота заполнения. Иногда для образования кодов вместо импульсов, различающихся по значению параметра, служит сам факт наличия или отсутствия импульсов ($m=2$).

Из соображений помехоустойчивости в телемеханических системах применяются только комплектные коды, т. е. состоящие из постоянного (n) числа импульсов (элементов кода) в каждой комбинации.

Простейшая система кодов состоит из всех возможных сочетаний n элементов кода с m значениями импульсного признака. При этом общее число кодовых комбинаций (кодов)

$$N = m^n.$$

Такие коды часто называют *числовыми*, так как принцип формирования их аналогичен принципу построения числовой системы с основанием счисления m и числом разрядов n.

Наиболее часто применяются *двоичные коды*, т. е. коды с двумя значениями импульсного признака ($m=2$). В этом случае

$$N=2^n.$$

Так, например, при построении кода из трех импульсов ($n=3$), различающихся полярностью ($m=2$), получаем систему из $N=2^3=8$ кодов (табл. 1). Увеличив число элементов кода до $n=5$, получим $N=2^5=32$ кода.

Система кодов с $m=2$ отвечает последовательности двоичных чисел (см. приложение 1). Действительно, если заменить знаки минус и плюс соответственно цифрами 0 и 1, то коды табл. 1 запишутся так, как показано в табл. 2. В отличие от обычной записи двоичных чисел, отвечающих десятичным числам 0, 1,..., 7, слева от значащих цифр (для кодов с порядковыми номерами 0, 1, 2, 3) здесь приписаны нули, с тем чтобы сделать коды комплектными ($n=3$).

Таблица 1

Порядковый номер кода	Номер элемента кода		
	1	2	3
0	—	—	—
1	—	—	+
2	—	+	—
3	—	+	+
4	+	—	—
5	+	—	+
6	+	+	—
7	+	+	+

Таблица 2

Порядковый номер кода	Числовая запись кода
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

2-2. КОДЫ С ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬЮ

Числовые коды применяются в телемеханических системах лишь в тех случаях, когда требования к надежности передачи невысоки или искажение одной из кодовых комбинаций неопасно. Это объясняется низкой помехоустойчивостью таких кодов. Действительно, рассматривая табл. 2, нетрудно установить, что искажение одного элемента любого из кодов всегда приводит к превращению этого кода в другой код данной таблицы (коды различаются минимально— всегда лишь в одном элементе). Например, если в коде № 3 правая единица в результате действия помехи будет принята за нуль, то искаженный код будет расшифрован, как код № 2.

Повышение помехоустойчивости может быть достигнуто выбором такой системы кодов, в которой наложены дополнительные ограничения, обеспечивающие различие кодов не менее чем в двух или большем числе элементов. Нетрудно установить, что при этом для получения прежнего числа кодов N потребуется увеличить число элементов кода n. Увеличение числа элементов оценивают коэффициентом избыточности

$$U=\frac{n-n_0}{n_0},$$

где n — число элементов кода;

n_0 — число элементов числового кода (в частном случае двоичного).

Выбирая систему кодов с повышенной помехоустойчивостью, исходят из двух возможных способов защиты от выполнения искаженных кодов:

а) искаженный сигнал не должен быть выполнен;

б) искаженный сигнал должен быть скорректирован и исполнен как исходный (неискаженный) сигнал.

Соответственно различают две разновидности помехозащищенных кодов:

а) коды с обнаружением искажений;

б) коды с коррекцией искажений.

Коды с обнаружением искажений. Простейшие из этой группы коды составлены по системе «чет-нечет». Принцип построения такой системы кодов заключается в том, что каждый двоичный код дополняется вспомогательным разрядом — нулем или единицей, с тем чтобы число единиц в коде было четным (или нечетным). При такой системе кодов искажение одного из элементов любого кода (переход единицы в нуль или наоборот) всегда будет обнаружено: искаженный код будет содержать нечетное (или четное) число единиц.

Общее число кодов в системе с обнаружением искажений

$$N = 2^{n-1}; \; n = n_0 + 1.$$

Избыточность

$$U = \frac{n - n_0}{n_0} = \frac{(n_0 + 1) - n_0}{n_0} = \frac{1}{n_0}.$$

В табл. 3 приведена система кодов с дополнением до четности ($N = 8$; $n = 4$; $n_0 = 3$); контрольный разряд приписан справа). Избыточность $U = \frac{1}{3}$.

Таблица 3

Порядковый номер кода	Код	Порядковый номер кода	Код
0	0000	4	1001
1	0011	5	1010
2	0101	6	1100
3	0110	7	1111

В кодах этого типа дополнительное свойство — возможность обнаружения искажения одного из элементов — получена за счет избыточности. Заметим, что каждый из кодов табл. 3 отличается от другого не менее чем двумя элементами.

Другая разновидность кодов с обнаружением искажений — *коды на одно сочетание.* Здесь коды построены по системе сочетания из n элементов по k единиц, т. е. каждый из кодов содержит одинаковое число (k) единиц. Как и в предыдущем случае, коды различаются не менее чем двумя элементами.

Общее число кодов этого типа

$$N = C_n^k = \frac{n!}{k!\,(n-k)!} = \frac{n(n-1)(n-2)\ldots(n-k+1)}{k!}.$$

Наибольшее число кодов для выбранного n получаем при следующих оптимальных значениях k:

при четном n — с $k_{\text{опт}} = \frac{n}{2}$;

при нечетном n — с $k_{\text{опт}} = \frac{n \pm 1}{2}$.

По техническим причинам (из условий простоты построения дешифраторов) наиболее приемлемы коды с $k < k_{\text{опт}}$; особенно часто используются коды с $k=2$. На примере в табл. 4 приведена система кодов типа C_5^2 ($n=5$; $k=2$; $N=10$).

Таблица 4

Порядковый номер кода	Код	Порядковый номер кода	Код
1	00011	6	01100
2	00101	7	10001
3	00110	8	10010
4	01001	9	10100
5	01010	10	11000

В данном случае избыточность $U = \frac{5-4}{4} = \frac{1}{4}$, так как для составления числовых кодов (десяти кодов на все сочетания) требуется $n_0 = 4$ элементов.

Такая же избыточность получается для кодов «чет-нечет», хотя в общем случае избыточность для кодов на одно сочетание несколько выше, чем кодов «чет-нечет».

Анализ помехоустойчивости этих двух типов кодов показывает, что при равной (полной) защищенности от искажений одного элемента коды на одно сочетание обладают повышенной помехоустойчивостью при искажении двух и более элементов.

Иногда применяют так называемые *сменно-качественные коды*, т. е. коды с чередующимися значениями импульсного признака. Для построения таких кодов число значений импульсного признака m должно быть не менее трех. Таблица кодов включает все возможные комбинации n элементов кодов, кроме комбинаций с повторяющимися в соседних элементах кода значениями импульсного признака. Этому правилу, например, при $m=3$ (значения импульсного признака 0, 1 и 2) и $n=6$, отвечает код 012102. Общее число кодов

$$N = m\,(m-1)^{n-1},$$

т. е. существенно меньше чем m^n.

У кодов такого вида обнаруживаются лишь те единичные искажения, в результате которых соседние импульсы получают одинаковые значения импульсного признака (например, при замене 1 на 0 или 2 во втором элементе кода 012102 получаются коды 002102 или 022102); другие искажения не обнаруживаются (например, при замене в третьем элементе кода 2 на 0 образуется код 010102, отвечающий закону построения сменно-качественных кодов). Таким образом, коды этого вида не обладают полной защищенностью от единичных искажений.

Коды с коррекцией искажений. Пусть в таблицу включены только такие коды, которые отличаются друг от друга не менее чем тремя элементами. Очевидно, что искажение двух элементов одного из кодов не приведет к образованию нового кода, совпадающего с каким-либо из кодов данной таблицы. Таким образом, искажение двух элементов кода будет обнаружено. При искажении одного элемента какого-либо кода всегда можно определить, какой именно код был послан, так как код с искажением отличается от остальных кодов таблицы не менее чем двумя элементами. Такой искаженный код может быть скорректирован.

Для примера рассмотрим систему пятиэлементных кодов ($n=5$), отличающихся друг от друга не менее чем тремя элементами:

1) 01001; 2) 01110; 3) 10010; 4) 10101.

Пусть принят код 01010. Последовательно сравнивая этот код с кодами таблицы, видим, что принятый код отличается от кода № 1 двумя элементами, от кода № 2—одним элементом, от кода № 3—двумя элементами, от кода № 4—пятью элементами. Предполагая возможность искажения в одном элементе, устанавливаем, что это код № 2, и принятый код может быть воспроизведен как код № 2.

Понятно, что при приеме кода, искаженного в двух элементах, установить первоначальный код, а следовательно, скорректировать искажение не удастся. Например, в результате искажения двух элементов в коде № 2 может быть получен код 01011, совпадающий с искаженным в одном элементе кодом № 1.

Вероятность искажения двух элементов кода значительно ниже, чем вероятность искажения одного элемента. В предельном случае она равна квадрату вероятности искажения одного элемента. Поэтому, допуская маловероятное исполнение искаженных в двух элементах кодов, можно корректировать единичные искажения кодов. Для выполнения коррекции единичного искажения достаточно построить цепи расшифровки кодов таким образом, чтобы исполнительный элемент включался при приеме как неискаженного кода, так и его «кодов-спутников», т. е. семейства кодов, отличающихся от данного одним элементом.

Для рассмотренного примера «коды-спутники» даны в табл. 5. Но такой способ расшифровки кодов практически не применяется вследствие громоздкости дешифраторов и рассмотрен только для пояснения принципа коррекции.

Новые свойства кодов были здесь, как и в предыдущих случаях, получены путем увеличения избыточности. Действительно, рассмотренная выше система пятиэлементных кодов с коррекцией содержит всего лишь четыре кода, тогда как при двоичной системе и том же числе элементов ($n=5$) было бы получено 32 кода. Для получения

Таблица 5

Код	„Коды-спутники"	Код	„Коды-спутники"
1) 01001	1а) 01000 1б) 01011 1в) 01101 1г) 00001 1д) 11001	3) 10010	3а) 10011 3б) 10000 3в) 10110 3г) 11010 3д) 00010
2) 01110	2а) 01111 2б) 01100 2в) 01010 2г) 00110 2д) 11110	4) 10101	4а) 10100 4б) 10111 4в) 10001 4г) 11101 4д) 00101

четырех различных двоичных кодов достаточно всего два элемента ($n_0=2$) в каждом коде. Избыточность

$$U=\frac{n-n_0}{n_0}=\frac{5-2}{2}=\frac{3}{2}.$$

Путем дальнейшего увеличения избыточности могут быть составлены системы кодов с коррекцией двух и более и обнаружением трех и более искажений.

Обобщая возможности кодов с числом импульсных признаков $m=2$, обладающих избыточностью, можно связать минимальное число элементов d, на которое различаются друг от друга коды данной таблицы, со способностью обнаруживать искажения r элементов и корректировать искажения s элементов:

$$d=r+s+1 \quad (r\geqslant s).$$

Так, например, для двоичных кодов $r=0$, $s=0$; $d=1$.

Для кодов с обнаружением единичного искажения $r=1$, $s=0$, $d=2$. Для кодов с обнаружением искажения двух элементов и коррекцией единичного искажения $r=2$, $s=1$, $d=4$.

Если условие $r\geqslant s$ не соблюдается, последней формулой пользоваться нельзя. Например, если осуществляется только исправление ошибки ($r=0$), то для выбора d надо пользоваться формулой

$$d=2s+1.$$

2-3. РАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИГНАЛА

Выше были рассмотрены способы построения сигналов из группы элементов, которым придаются различные импульсные признаки. При передаче сигналов необходимо отделить каждый элемент от соседнего, сохранив порядковые места (разряды) элементов сигнала.

Применяются три способа разделения элементов сигнала:

а) *электрическое* или кондуктивное разделение, при котором для передачи каждого элемента выделяется отдельная электрическая цепь;

б) *частотное* разделение, т. е. передача каждого элемента сигнала колебаниями определенной частоты;

в) *временнóе* разделение, при котором элементы сигнала передаются последовательно во времени (поочередно).

Упрощенные схемы на рис. 12 поясняют реализацию этих трех способов разделения элементов сигнала. Для наглядности взят случай, когда импульсные признаки не используются и их роль выполняет сам факт наличия (1) или отсутствия (0) импульса. Ключи *1К*, *2К*... задают соответствующие элементы — импульсы сигнала; установленные на приемном конце линии связи реле *1Р*, *2Р*... фиксируют прием этих импульсов.

При *электрическом* разделении (рис. 12,*а*) применяется многопроводная линия связи, каждый из проводов которой закрепляется за определенным порядковым элементом — импульсом сигнала; число проводов линии (кроме общего провода) равно числу элементов сигнала n.

При *частотном* разделении (рис. 12,*б*) применяются генераторы синусоидальных колебаний $Г_1$, $Г_2$... с частотами f_1, f_2... и пропускающие эти частоты полосовые фильтры *1ПФ*, *2ПФ*... (фильтры передачи) и *1ПФ'*, *2ПФ'*... (фильтры приема). При помощи фильтров колебания разных частот, соответствующих элементам сигнала, разделяются; реле *1Р*, *2Р*... включены на выходе фильтров через детекторы *1Д*, *2Д*...

Временнóе разделение (рис. 12,*в*) осуществляется синхронно переключающимися коммутаторами $Р_{\mathrm{I}}$ и $Р_{\mathrm{II}}$; при этом последовательно во времени образуются цепи для передачи элементов сигнала (*1К-1Р*, *2К-2Р* и т. д.).

На рис. 13 показаны диаграммы для систем частотного (*а*) и временнóго (*б*) разделения элементов сигнала.

Ширина полосы частот, пропускаемой фильтрами, Δf (рис. 13,*а*) выбирается в зависимости от требования к скорости нарастания сигнала за приемным фильтром. Время установления сигнала на выходе фильтра $\Delta t \approx \frac{1}{\Delta f}$. Интервал частот между полосами пропускания двух фильтров $\Delta f'$ необходим для защиты от частичного проникновения сигнала соседнего генератора, поскольку фильтр за пределами полосы пропускания не обладает бесконечным затуханием.

При временном разделении импульсы $t_и$ отделяются друг от друга защитными интервалами $t_п$. Это также необходимо для устранения взаимного влияния за счет попадания в реле соседнего канала «хвоста» импульса, задний фронт которого после прохождения через фильтр приобретает близкую к экспоненте форму.

Очевидно, что частотное и временнóе разделение эквивалентны в отношении использования пропускной способности канала связи, если защитные интервалы (частотный и временной) имеют одинаковую относительную ширину. О некоторых особенностях применения того или иного способа разделения при построении телемеханических систем будет сказано ниже.

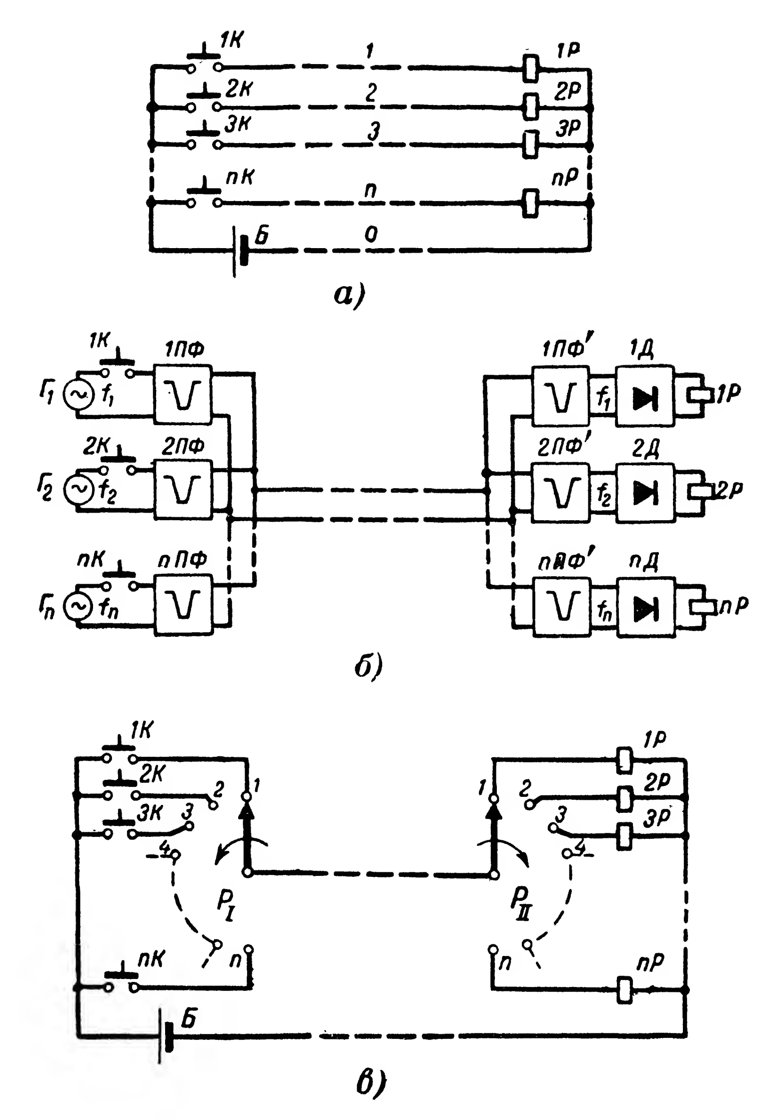


Рис. 12. Разделение элементов сигнала.
а — электрическое; *б* — частотное; *в* — временное.

Синхронизация при временнóм разделении. Для реализации временнóго разделения, как уже было сказано, необходима синхронизация переключений передающего и приемного распределителей. Принципиально возможные способы синхронизации показаны на рис. 14 упрощенными схемами, на которых коммутаторы для наглядности изображены в виде электромеханических контактных переключателей.

1. *Жесткая синхронизация.* Подвижные части переключателей жестко связаны и приводятся в движение общим приводом (рис. 14,*а*). Очевидно, что в системах телемеханики такой способ непосредственно использован быть не может, так как переключатели

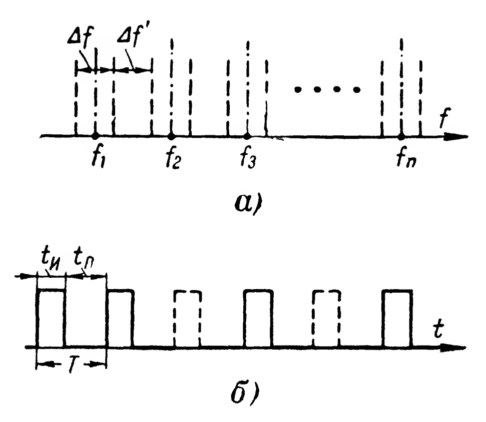


Рис. 13. Диаграммы разделения.
а — частотного; *б* — временнóго.

P_{I} и P_{II} находятся на разных концах линии связи. Практически применяется разновидность этого способа — *синхронизация общей сетью переменного тока* (рис. 14,*б*). В этом случае источником импульсов движения распределителей является общая сеть электроснабжения. Постоянная разность фаз питающих напряжений может быть скорректирована. Рассогласование положений распределителей определяется только изменением разности фаз, вызванным изменяющимся режимом нагрузки электроснабжающей сети.

2. *Циклическая синхронизация.* В этом случае распределители переключаются под действием самостоятельных генераторов — источников управляющих импульсов (рис. 14,*в*), настроенных приблизительно на одинаковую частоту. Очевидно, что даже при очень точной настройке генераторов фазовая ошибка, а следовательно, и рассогласование положений распределителей со временем будут накапливаться. Для устранения рассогласования после каждого очередного цикла переключений производится синхронизация распределителей, т. е. совмещение их начальных положений и начальных фаз генераторов. Для синхронизации посылается специальный импульс с передающей стороны. Естественно, что разность частот генераторов должна быть достаточно мала, чтобы за один цикл не нако-

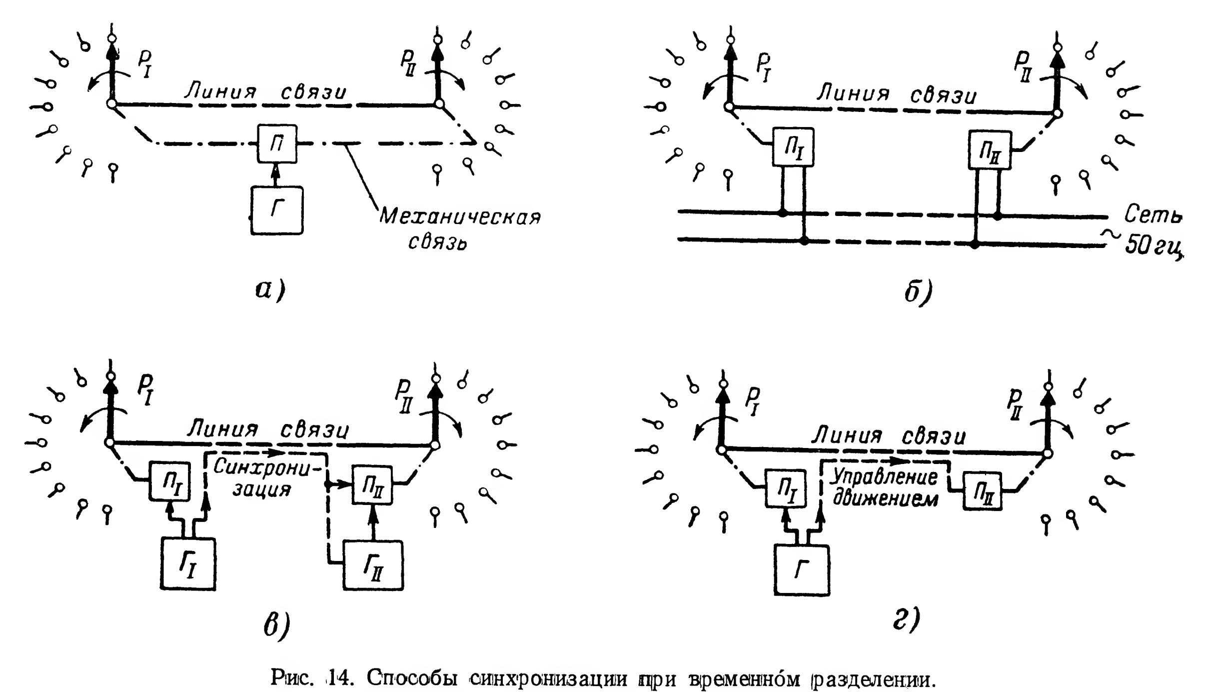


Рис. 14. Способы синхронизации при временно́м разделении.

а — жесткая синхронизация; *б* — синхронизация общей сетью; *в* — циклическая синхронизация; *г* — пошаговая синхронизация.

Г — генератор импульсов; *Р* — распределитель; *П* — привод распределителя.

пилась недопустимая ошибка (рассогласование на один шаг или более).

3. *Пошаговая синхронизация.* При этом способе используется общий генератор импульсов, управляющий переключениями как местного распределителя, так и распределителя, установленного на противоположном конце линии связи (рис. 14,*г*). Таким образом, оба распределителя каждый шаг совершают одновременно (точнее, со сдвигом на время передачи импульса по каналу связи). В принципе для передачи импульсов переключения требуется отдельный канал связи, но обычно передача импульсов сигнала и переключения совмещается путем модуляции импульсов переключения импульсными признаками сигнала.

Глава третья

СИСТЕМЫ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ

3-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Системы телеизмерения предназначены для передачи на расстояние значений контролируемых физических величин (параметров). Как правило, здесь осуществляется передача непрерывных сообщений. Контролируемая величина для передачи по каналу связи преобразуется в сигнал, искажения которого в процессе передачи должны быть минимальными. Сигналы могут быть либо непрерывными, либо дискретными.

На рис. 15 представлена блок-схема системы телеизмерения.



Рис. 15. Блок-схема телеизмерительной системы.

1 — датчик контролируемой величины; *2* — передатчик; *3* — приемник; *4* — выходной прибор.

Обычно контролируемый параметр x предварительно преобразуется датчиком *1* в промежуточный параметр z, а затем при помощи передатчика *2* — в сигнал y. На приемной стороне системы связи сигнал поступает на вход приемника *3*, питающего выходной прибор *4*.

В системах телеизмерения с непрерывными сигналами передатчик *2* представляет собой функциональный преобразователь или модулятор, а в системах с дискретными сигналами — преобразователь промежуточного параметра z в код. Приемник, как правило, преобразует сигнал, поступающий с линии связи, в электрическую величину (ток или напряжение), измеряемую стрелочным или самопишущим прибором. При дискретных сигналах приемником является дешифратор кодов, выходной величиной служит ток или напряжение; в некоторых случаях показания воспроизводятся в цифровой форме.

3-2. СИСТЕМЫ С НЕПРЕРЫВНЫМИ СИГНАЛАМИ

Наиболее просты в этой группе *телеизмерительные системы интенсивности*, т. е. системы, в которых в качестве параметра сигнала используется величина тока или напряжения (интенсивность сигнала).

Структура таких систем предельно проста: первичный преобразователь измеряемой величины в ток или напряжение (датчик) присоединяется непосредственно к линии связи; на приемной стороне к линии подключается измеритель тока (обычно стрелочный или самопишущий миллиамперметр) или напряжения (например, автоматический потенциометр). Очевидно, что изменение затухания линии вследствие нестабильности ее параметров неизбежно вызывает погрешность телеизмерения. Это ограничивает выбор типа канала связи системы телеизмерения, а также расстояние передачи.

Обычно необходимая точность телеизмерения (относительная погрешность в пределах 1,5—2,5%) обеспечивается только при передаче сигналов по выделенным цепям кабелей связи длиной до 30—50 *км*. Воздушные линии связи вследствие значительной и непостоянной по величине проводимости изоляции («утечки») приемлемы лишь при малых расстояниях передачи (до 10 *км*).

Системы интенсивности разделяют на *системы тока* и *системы напряжения*. Критерием служит соотношение между входным сопротивлением приемника $z_{пр}$ и входным сопротивлением линии z_2, измеренным на выходных зажимах (с присоединенным передатчиком). Для системы тока должно быть $z_{пр} \ll z_2$, для системы напряжения $z_{пр} \gg z_2$. Передача сигналов, как правило, осуществляется постоянным током (напряжением).

Применяются три разновидности телеизмерительных систем интенсивности:

а) *Небалансная система тока* (рис. 16,*а*). Здесь применяется небалансный (без обратной связи) преобразователь измеряемой величины x в ток i. Для ограничения погрешностей от изменения сопротивления линии связи $r_л$ линия присоединяется к преобразователю через большое балластное сопротивление $R_б$ ($R_б \gg r_л$).

б) *Балансная система тока* (рис. 16,*б*). В такой системе применяется балансный преобразователь, т. е. преобразователь с отрицательной обратной связью по току выхода. В результате значение тока на входе линии i автоматически поддерживается в заданной зависимости от измеряемой величины x. Это устраняет зависимость тока в линии от изменения ее сопротивления. Погрешность от изменения утечки здесь, как и в предыдущей системе, не устраняется и не ограничивается.

в) *Потенциометрическая (уравновешенная) система напряжения* (рис. 16,*в*). Напряжение u, создаваемое преобразователем на передающей стороне, измеряется автоматическим потенциометром *АП*. В установившемся режиме входной ток автопотенциометра близок к нулю (не превышает тока нечувствительности прибора), т. е. входное сопротивление потенциометра весьма велико. Изменение сопротивления линии практически не сказывается на точности телеизмерения. Влияние проводимости изоляции заметно проявляется лишь при значительном сопротивлении линии.

Более широкую и универсальную по применению группу телеизмерительных систем с непрерывными сигналами составляют *им-*

пульсные и частотные системы. В системах этой группы сигнал формируется либо в виде периодических посылок импульсов, модулированных измеряемой величиной по длительности, фазе или частоте следования[1], либо в виде синусоидальных колебаний, модулированных по частоте. Такие системы сводят к минимуму погрешности телеизмерения от нестабильности параметров линии связи, обеспечивают возможность передачи сигналов на большие расстояния. Дальность передачи определяется уровнем сигнала, поступающего на вход приемника, чувствительностью приемника (минимальным уров-

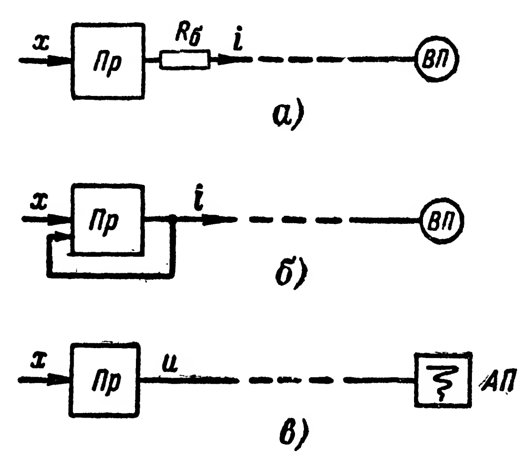


Рис. 16. Блок-схемы телеизмерительных систем интенсивности.

а — небалансная система тока; *б* — балансная система тока; *в* — потенциометрическая система напряжения.

ПР — преобразователь; *ВП* — выходной прибор (миллиамперметр); *АП* — автоматический потенциометр.

нем сигнала в отсутствие помех, при котором сохраняется надежное действие приемника) и превышением на входе приемника уровня сигнала над уровнем помех. Необходимое превышение зависит как от характера и параметров сигнала, так и от частотного спектра помех и свойств приемника, определяющих его помехозащищенность. Другие ограничения, накладываемые характеристиками канала, будут выявлены при рассмотрении конкретных классов телеизмерительных систем.

К группе телеизмерительных систем с *временным параметром* относятся *широтно-импульсные системы* (с модуляцией по длительности) и *фазо-импульсные системы* (с модуляцией по фазе). Характеристики сигналов при таких видах модуляции были рассмотрены выше (см. гл. 2). В обоих случаях устанавливается функциональная зависимость между измеряемой величиной x и длительностью им-

[1] Амплитудная модуляция импульсов применяется только в сочетании со вторичной частотной модуляцией.

пульса $t_и$ (широтно-импульсные системы, рис. 10,*а*) или смещением фазы $t_и$ (фазо-импульсные системы, рис. 10,*б*): $t_и=\varphi(x)$. В большинстве систем эта зависимость линейна:

$$t_и = t_0 + k(x).$$

Время-импульсное преобразование осуществляется различными способами. В технике телеизмерения чаще всего применяются следующие способы время-импульсного преобразования:

а) *Преобразование угла отклонения первичного измерительного прибора в длительность импульса.* Поясним это преобразование на примере простейшей конструкции (рис. 17). На первичном измери-

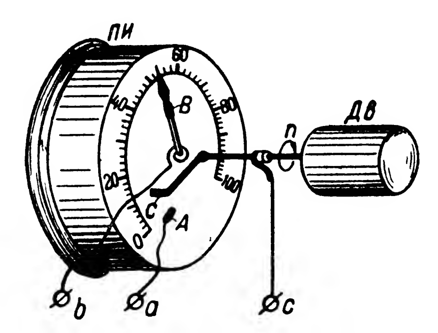


Рис. 17. Время-импульсный преобразователь угла отклонения первичного измерительного прибора.

ПИ — первичный измерительный прибор; *Дв* — синхронный двитагель.

тельном приборе *ПИ* устанавливается контактное устройство. Неподвижный контакт *А* закрепляется несколько левее начальной отметки шкалы, а контакт *В* — на стрелке прибора. Щеточный контакт *С* приводится во вращение маломощным синхронным двигателем. Промежуток времени между моментами касания вращающимся контактом *С* контактов *А* и *В*

$$t = \frac{\alpha_0 + \alpha_и}{360^\circ n},$$

где α_0 — начальный угол (от контакта *А* до начальной отметки шкалы), *град*;

$\alpha_и$ — угол отклонения стрелки прибора, *град*;

n — скорость вращения двигателя, *об/сек*.

Полученные при замыкании контактов кратковременные импульсы могут быть либо непосредственно использованы для передачи сигналов по фазо-импульсному методу, либо преобразованы в импульсы, модулированные по длительности (передача по широтно-импульсному методу).

Рассмотренный способ преобразования реализован в ряде конструкций медленно действующих время-импульсных систем (период составляет 1 или 5 или 15 *сек*).

б) *Способ развертывающего преобразования* (рис. 18). Измеряемая величина преобразуется в напряжение

$$u_1 = \varphi(x).$$

Развертывающее напряжение u_2 имеет пилообразную форму.

Напряжения u_1 и u_2 сравниваются, и моменты равенства напряжений отмечаются импульсами засечки (m, n). Интервал $t_и$ между импульсами засечки пропорционален напряжению u_1 (рис. 18,*б*). При помощи формирующей схемы релейного действия импульсы засечки могут быть преобразованы в импульсы длительностью $t_и$ (рис. 18,*в*). Таким образом, получаются сигналы как по фазо-импульсному методу, так и по широтно-импульсному.

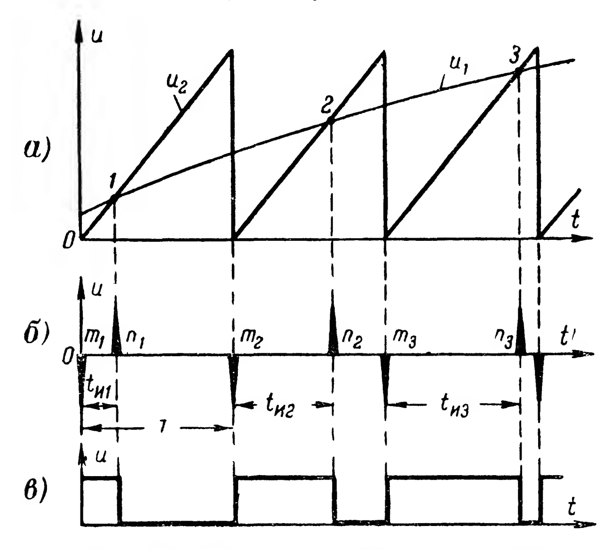


Рис. 18. Диаграмма развертывающего преобразования.

а — процесс уравновешивания; *б* — фазо-импульсный сигнал; *в* — широтно-импульсный сигнал.

В качестве характерного примера реализации способа развертывающего преобразования рассмотрим принцип действия так называемого *«экспоненциального преобразователя»* (рис. 19,*а*). Здесь развертывающее напряжение формируется зарядной цепочкой RC. Развертывающее напряжение u_C сравнивается с напряжением $U_д$, снимаемым с движка потенциометрического датчика $R_д$.

При замыкании ключа K начинается зарядка конденсатора C через сопротивления R и $R_н$. Этот процесс продолжается до момента t_1 (рис. 19,*б*), когда нарастающее по экспоненциальному закону напряжение u_C достигает значения напряжения $U_д$. В этот момент открывается диод $Д$, и дальнейший рост u_C прекращается (предполагается, что $R_д \gg R$ и внутреннее сопротивление источника энергии

мало), как это показано на рис. 19,*б*. Соответственно в момент t_1 зарядный ток i_C падает до нуля (рис. 19,*в*); подобным же образом изменяется и напряжение $u_н$, снимаемое с сопротивления $R_н$.

В момент t_2 ключ *К* размыкается и конденсатор *С* разряжается через диод *Д* и секцию R_1 датчика. Затем вновь включается ключ *К* и процесс повторяется.

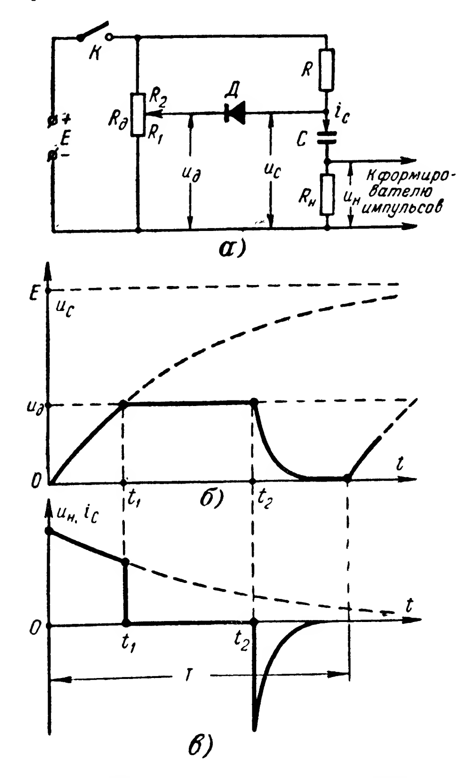


Рис. 19. Экспоненциальный время-импульсный преобразователь.

а — принципиальная схема; *б* и *в* — графики напряжения и тока.

Как нетрудно установить, зависимость момента t_1 от соотношения сопротивлений секций потенциометрического датчика $\frac{R_1}{R_2} = \gamma$ с учетом принятых допущений может быть выражена приближенно формулой

$$t_1 \approx RC \ln \frac{E}{E - U_д} = RC \ln \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = RC \ln (1 + \gamma).$$

При несущественном видоизменении схемы экспоненциальный преобразователь может работать и с датчиком напряжения.

В телеизмерительной технике применяются и другие схемы время-импульсных преобразователей.

Обратное преобразование время-импульсного сигнала в показания, пропорциональные интервалу $t_и$, производится на приемной сто-

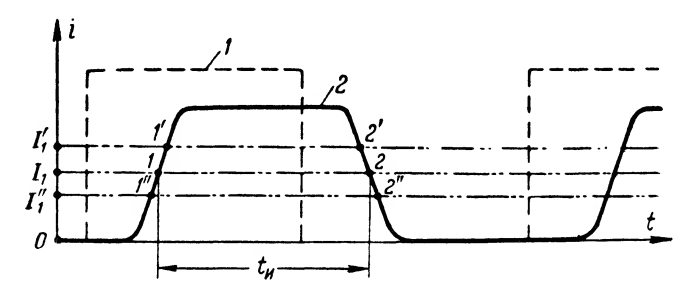


Рис. 20. Искажение формы импульса при передаче по каналу связи.

1 — импульсы на входе канала связи; *2* — импульсы на выходе канала связи.

роне либо при помощи электромеханического измерителя длительности импульса с синхронным приводом (медленнодействующие системы), либо путем измерения среднего тока (быстродействующие системы). В последнем случае через измерительный прибор, воспроизводящий показания, в течение интервала времени $t_и$, пропускается стабилизированный ток I_0. При периодическом следовании импульсов с периодом T средний ток в цепи прибора пропорционален $t_и$:

$$I_{ср} = I_0 \frac{t_и}{T},$$

Переменная составляющая тока в цепи прибора отфильтровывается.

Точность время-импульсных систем в значительной степени зависит от максимальной частоты F полосы пропускания канала связи. Это связано с искажением формы импульса при ограничении частотного спектра сигнала: с уменьшением ширины полосы частот передний и задний фронты импульсов становятся более пологими (рис. 20). Ошибка в определении длительности импульса определяется как крутизной фронтов, так и уровнем I_1, на котором отсчитывается длительность импульса.

В первом приближении можно считать, что относительная погрешность телеизмерения δ связана с частотой F и периодом T следующей зависимостью:

$$\delta = \frac{k}{TmF},$$

где $k = 0,1 \ldots 0,25$ в зависимости от стабильности амплитуды сигнала;

$$m = \frac{t_{и.н} - t_{и.о}}{T};$$

$t_{и.о}$ и $t_{и.н}$ — соответственно длительность импульса для нижнего и верхнего предела измеряемого параметра [1].

Заметим, что параметры T и F определяют также время установления показаний на выходе приемника $T_{уст}$.

Обычно для систем и телеизмерения считают $T_{уст} = 5\tau$, где τ — постоянная времени приемника. На основании теоремы отсчетов

$$T \leqslant \frac{1}{2F}.$$

Приняв для приближенной оценки $F = \frac{1}{\tau}$, получим:

$$T = \frac{T_{уст}}{10}.$$

Воспользовавшись приведенной выше зависимостью погрешности δ от T и F, находим:

$$T_{уст} \approx \frac{10k}{Fm\delta}.$$

Частотные системы. Эта группа систем включает как *частотно-импульсные системы,* так и *собственно частотные системы,* т. е. такие, в которых сигнал имеет вид синусоидальных колебаний, модулированных измеряемым параметром по частоте.

Частота импульсов (или частота синусоидального тока) здесь является функцией измеряемой величины:

$$f = \varphi(x).$$

Частотно-импульсные системы обычно применяются только при частотах следования импульсов примерно до 20 *гц*; собственно частотные системы (синусоидального тока) используются на более высоких частотах — от десятков до тысяч герц. При этом в частотно-импульсных системах применяется модуляция частоты импульсов в широком диапазоне — вплоть до $f_н/f_0 = 10$, где $f_н$ и f_0 — соответственно частоты, отвечающие нижнему и верхнему пределам измерения. В частотных системах, работающих на более высоких частотах, выбирают частотный диапазон в пределах

$$\frac{f_н}{f_0} = 1,05 \div 1,5,$$

чтобы ограничить полосу частот сигнала. Вследствие этого к стабильности частотных преобразователей предъявляются более высокие

[1] Приведенная здесь зависимость получается из уравнения фронта импульса при ширине полосы пропускания F с учетом возможной нестабильности высоты импульса по отношению к уровню отсчета I_1.

требования, так как с уменьшением отношения $k_f=f_н/f_0$ при заданной нестабильности частотного преобразования $\delta f=\Delta f/f_н$ относительная погрешность телеизмерения δ увеличивается:

$$\delta \leqslant \frac{\Delta f}{f_н - f_0} = \frac{k_f}{k_f - 1}\,\delta f.$$

Получило распространение несколько способов частотного преобразования в передающих устройствах частотных систем:

а) *Преобразование угла отклонения первичного измерительного прибора в частоту при помощи C-, L- или R-датчика.* В этом случае подвижная часть первичного измерителя сочленяется с датчиком. Последний изменяет частоту генератора в зависимости от угла отклонения первичного измерителя.

Для примера на рис. 21,*а* показан такой преобразователь, состоящий из первичного измерительного прибора *ПИ* с емкостным датчиком C_v и RC-генератора *Г*.

Частота генератора определяется формулой

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1(C_1+C_v)R_2C_2}}.$$

Если функция преобразования емкостного датчика линейна:

$$C_v = C_{vн} - k_1\alpha,$$

то результирующая функция частотного преобразования имеет вид

$$f = \frac{k_1}{\sqrt{k_2 - \alpha}}$$

(k_1, k_2 — постоянные величины).

В случае применения датчика с нелинейной функцией преобразования зависимость $f=\varphi(\alpha)$ может быть сделана линейной.

б) *Управление настройкой генератора напряжением (током), функционально связанным с измеряемым параметром.* Этот способ применяется для управления как генераторами синусоидальных колебаний, так и генераторами релаксационных колебаний.

Для управления частотой колебаний генераторов первого вида (частотная модуляция) напряжение (ток) воздействует на нелинейный элемент контура, изменяя величину одного из параметров (индуктивность или емкость в LC-генераторе, активное сопротивление или емкость в RC-генераторе). Наибольшие трудности связаны здесь с обеспечением стабильной характеристики управления.

В качестве примера на рис. 21,*б* показан LC-генератор, который настраивается при помощи тока $i_у$, пропорционально измеряемой величине; ток $i_у$ изменяет эффективную индуктивность дросселя насыщения *ДН*. В рабочей части характеристики управления зависимость частоты от тока линейна:

$$f = f_0 + ki_у.$$

В генераторах релаксационных колебаний управление частотой при помощи напряжения осуществляется наиболее просто, хотя нередко возникают трудности с обеспечением стабильности характеристики управления.

в) *Балансные схемы.* Наряду с прямым управлением настройкой генератора в телеизмерительных устройствах применяются частотные преобразователи по балансной схеме, т. е. с отрицательной обратной связью по частоте. Такие схемы используются преимущественно при

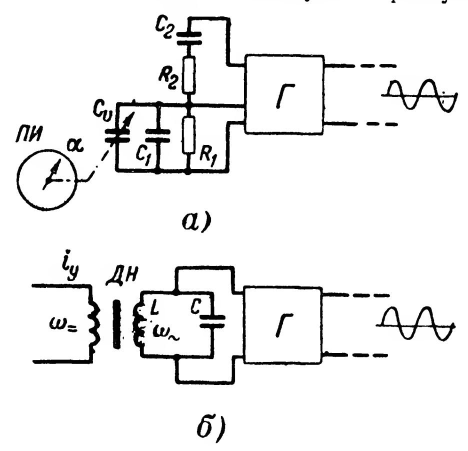


Рис. 21. Частотные преобразователи.
а — с первичным измерительным прибором (*ПИ*) и емкостным датчиком (C_v); *б* — с дросселем насыщения (*ДН*); *Г* — генератор синусоидальных колебаний.

управлении напряжением или током. Обобщенная блок-схема балансного частотного преобразователя представлена на рис. 22. Здесь преобразователь с управлением напряжением дополнен усилителем и узлом обратной связи.

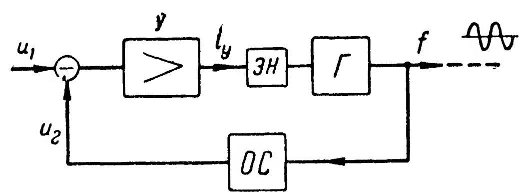


Рис. 22. Блок-схема балансного частотного преобразователя.
Г — генератор; *ЭН* — элемент настройки генератора; *У* — усилитель; *ОС* — узел обратной связи по частоте.

На входе схемы действует напряжение U_1, пропорциональное измеряемой величине. Напряжение выхода преобразователя обратной связи U_2 пропорционально отклонению частоты f от значения f_1, отвечающего нижнему пределу диапазона измерений:

$$U_2 = \beta(f - f_1).$$

Частота настройки генератора изменяется в линейной зависимости от усиленной разности напряжений $U_1 - U_2$:

$$f = f_1 + k(U_1 - U_2).$$

При этом частота настройки генератора подчиняется закону

$$f = f_1 + \frac{k}{1 + k\beta} U_1.$$

Таким образом, преобразователь работает как следящая система, поддерживающая заданную зависимость между частотой f и напряжением U_1.

Стабилизирующее действие обратной связи проявляется в значительном уменьшении погрешности $\delta f_{(k)}$, вызванной нестабильностью настройки генератора:

$$\delta f_{(k)} = \frac{1}{1 + k\beta} \delta k,$$

или

$$\delta f_{(k)} = S \delta k,$$

где δk — относительное изменение коэффициента прямого преобразования;

S — статизм регулирования.

Обычно статизм лежит в пределах 0,01—0,06 и, следовательно, стабилизация весьма эффективна.

Естественно, что преобразователь обратной связи должен обладать высокой стабильностью. Наряду с выигрышем в стабильности балансные схемы обладают и другим существенным преимуществом: благодаря применению усилителя чувствительность к управляющему сигналу может быть существенно повышена.

Для приема и воспроизведения сигналов частотных систем в принципе может быть выбран любой из частотомеров, применяемых в измерительной технике. Однако наибольшее распространение получили специфические устройства, преобразующие сигнал частотной системы в постоянный ток. К их числу относятся прежде всего *преобразователи с реактивными накопителями энергии.*

Принцип действия такого рода преобразователей заключается в том, что в течение периода сигнала (в некоторых схемах—дважды за период) через выходную цепь пропускается электрический заряд q_0, величина которого определяется количеством энергии, запасенной накопителем (емкостью, индуктивностью).

Среднее значение периодического тока в выходной цепи пропорционально частоте:

$$I_{\text{ср}} = q_0 f.$$

Следует оговориться, что вследствие неполной завершенности переходных процессов в течение периода сигнала эту зависимость надо считать приближенной.

Чаще других встречаются преобразователи с емкостным накопителем, представляющие собой разновидность частотомерной схемы Максвелла. Преобразователи этой группы применяются как в ча-

стотно-импульсных, так и в собственно частотных системах телеизмерения.

Вторая распространенная группа преобразователей — балансные преобразователи с настраиваемым частотным детектором (рис. 23). Частотный детектор *ЧД* (выявитель изменений частоты) настраивается на некоторую частоту $f_д$. Напряжение на выходе частотного

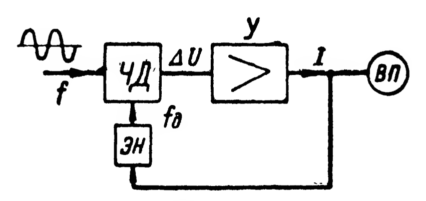


Рис. 23. Блок-схема балансного приемника частотной системы.

ЧД — частотный детектор; *ЭН* — элемент настройки частотного детектора; *У* — усилитель; *ВП* — выходной прибор.

детектора равно нулю, если $f=f_д$; при отклонении f от $f_д$ на выходе ЧД возникает напряжение небаланса ΔU, в первом приближении пропорциональное $\Delta f=f-f_д$. Напряжение небаланса усиливается (*У*), ток I на выходе усилителя протекает по цепи выходного прибора *ВП*. Вместе с тем вводится отрицательная обратная связь по току выхода: в зависимости от значения тока I изменяется настройка частотного детектора, так как ток I воздействует на элемент настройки *ЭН* частотного детектора.

Полагая все преобразования линейными, получаем следующие зависимости:

$$I = k'\Delta U = k\,(f - f_д);$$

$$f_д = f_1 + \beta I,$$

где f_1 — начальная частота диапазона. Отсюда

$$I = \frac{k}{1 + k\beta}\,(f - f_1).$$

Таким образом, преобразователь действует как следящая система, поддерживающая заданную зависимость между частотой f и током I.

Введение отрицательной обратной связи обеспечивает высокую стабильность преобразования при малом статизме $\left(\text{здесь } S = \frac{f-f_д}{f}\right)$. Вместе с тем усилитель обеспечивает достаточно большую мощность на выходе.

Приемники частотных систем, как правило, снабжаются ограничителем на входе. Это исключает паразитную амплитудную модуляцию сигнала, поступающего на частотный преобразователь приемника, и помехоустойчивость системы увеличивается.

3-3. СИСТЕМЫ С ДИСКРЕТНЫМИ СИГНАЛАМИ (КОДО-ИМПУЛЬСНЫЕ)

Переход от непрерывного сообщения к дискретному сигналу, как уже было указано выше, заключается в квантовании сообщения тем или иным способом. При этом процесс квантования сводится к замене непрерывных значений измеряемого параметра $0 \ldots x_н$ или $x_1 \ldots x_н$ конечным числом значений, отличающихся друг от друга на Δx (как правило, Δx постоянно). Выбор шага квантования Δx зависит от требуемой точности телеизмерения:

$$\frac{\Delta x}{x_н - x_1} \leqslant \delta_{доп}$$

($\delta_{доп}$ — допускаемая относительная погрешность телеизмерения).

Телеизмерение осуществляется путем посылки кодов, присвоенных квантованным значениям параметра. Общее число кодов

$$N = \frac{x_н - x_1}{\Delta x}.$$

За исключением немногих случаев, когда требование помехоустойчивости является определяющим, применяются незащищенные коды: двоичный, двоично-десятичный и рефлексный (код Грея).

Двоичные коды были разобраны выше достаточно подробно. При *двоично-десятичном коде* (разновидность двоичного) каждый из разрядов десятичного числа отдельно кодируется по двоичной системе. Для этого каждый десятичный разряд представляется в виде четырехэлементных кодов с разрядами 8—4—2—1, с помощью которых могут быть записаны числа от 0 до 9. Например, число 75 изображается кодом 0111—0101; первые четыре элемента кода представляют двоичное число, отвечающее десятичному числу 7, а второе — 5.

Такой способ кодирования создает некоторую избыточность: если при двоичных кодах на каждый десятичный разряд приходятся в среднем три элемента кода, то здесь число элементов кода на десятичный разряд увеличивается до четырех. Однако простота перевода двоично-десятичных сигналов в десятичные заставляет мириться с небольшой избыточностью.

Иногда применяется разновидность таких кодов с разрядами 4—2—2—1. При этом понижается вероятность больших ошибок при искажении сигналов.

Рефлексный код, называемый также *кодом Грея*, отличается от двоичного тем, что при переходе к следующему коду (в порядке возрастания чисел) изменяется только один элемент сигнала. Как будет показано далее, это оказывается ценным свойством для некоторых способов преобразования параметра в код. Для примера в табл. 6 приводятся трехэлементные двоичные коды и рефлексные коды для чисел от 0 до 7.

При двоичной системе кодирования общее число кодов $N=2^n$, что соответствует передаче чисел от 0 до 2^n-1 (n — число элементов кода). Погрешность телеизмерения, вызванная дискретным представлением измеряемой величины, составляет:

$$\delta_д \leqslant \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{N-1} = \pm \frac{1}{2(2^n-1)}.$$

Таблица 6

Десятичное число	Двоичный код	Рефлексный код (код Грея)	Десятичное число	Двоичный код	Рефлексный код (код Грея)
0	000	000	4	100	110
1	001	001	5	101	111
2	010	011	6	110	101
3	011	010	7	111	100

Например, при семи элементах кода

$$\delta_д \leqslant \pm \frac{1}{2(2^7-1)} \approx \pm 0{,}4\%.$$

При двоично-десятичных кодах связь между числом элементов кода и погрешностью $\delta_д$:

$$\delta_д \leqslant \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10^D}$$

(D — число десятичных разрядов кодируемого числа). Так как каждый десятичный разряд представляется четырьмя элементами кода, то

$$\delta_д \leqslant \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10^{n/4}}$$

(n всегда кратно 4).

Если применяется временнóе разделение импульсов кода, то, так же как для время-импульсных систем, может быть установлена зависимость между временем установления показаний $T_{уст}$, максимальной частотой F полосы пропускания канала связи и погрешностью $\delta_д$. При этом предполагается, что измеряемая величина воспроизводится непрерывно.

Как и в предыдущем случае, принимаем

$$T_{уст} = 10T_к,$$

где $T_к$ — длительность одного кода.

Полагая, что импульсы кода длительностью $t_и$ разделяются интервалами такой же длины, и не учитывая вспомогательных элементов кода (например, синхронизирующего импульса или интервалов, отделяющих один код от другого), получим:

$$T_к = 2nt_и.$$

Вместе с тем для передачи импульса длительностью $t_и$ требуется полоса частот $F \approx 1/t_и$. Следовательно,

$$T_{уст} \approx 20\frac{n}{F}.$$

Используя зависимость $\delta_д$ от n, получим:

а) для двоичных кодов

$$T_{уст} \approx 20 \frac{\log_2\left(\frac{1}{2\delta_д}+1\right)}{F};$$

б) для двоично-десятичных кодов

$$T_{уст} \approx 80 \frac{\log_{10}\frac{1}{2\delta_д}}{F}.$$

Преобразователи непрерывной величины в код. Принципиально различаются два способа дискретного преобразования: а) измеряемая величина преобразуется в угол отклонения измерительного прибора, а угол отклонения — в код; б) осуществляется преобразование в код тока или напряжения, эквивалентного измеряемой величине. Как будет показано дальше, второй способ более универсален и гибок, хотя и требует применения относительно сложных преобразователей.

а) Преобразование угла отклонения в код. Для этой цели применяются так называемые кодирующие диски. На концентрических окружностях диска (по числу элементов кода) выполнены контактные дуги, чередующиеся в порядке следования единиц в каждом разряде при последовательном увеличении номера кода. Либо диск, либо съемное устройство перемещается при помощи измерительного механизма. Таким образом, каждому углу отклонения измерительного механизма отвечает необходимый набор элементов кода. Для примера на рис. 24,*а* показана схема кодирующего диска для пятиэлементного двоичного кода.

Существенным недостатком диска является возможность ошибки в формировании кода на границе перехода от одного кода к другому, так как ошибочно сформированный код может содержать несколько разрядов, принадлежащих одному коду, и несколько разрядов соседнего кода. Например, на границе между кодами 01111 (в десятичной системе—15) и 10000 (в десятичной системе—16) могут быть ошибочно образованы любые сочетания из элементов этих двух кодов (граница отмечена на рис. 24,*а* звездочкой). В лучшем случае искаженный код будет отличаться на единицу от одного из исходных: 01110 (14) или 10001 (17); наибольшая ошибка может быть получена при формировании кодов 11111 (31) и 00000 (0).

Стремление исключить возможность больших ошибок и привело к созданию рефлексных кодов (кодов Грея). Кодирующий диск для формирования кодов Грея показан на рис. 24,*б*. Поскольку соседние коды отличаются здесь только в одном элементе, ошибка не превышает шага квантования.

Кодирующий диск может быть использован и для формирования двоично-десятичных кодов. Кодирующие диски выполняются как с контактным съемом, так и с бесконтактным (фотоэлектрическим, индукционным, емкостным или индуктивным).

Очевидный недостаток преобразователей с кодирующим диском — малое быстродействие, ограничиваемое временем успокоения изме-

рительного механизма. При многоканальном исполнении телеизмерительной системы преобразователем должен быть снабжен каждый прибор-датчик.

б) *Преобразование напряжения или тока в код.* Разработано значительное число устройств для такого преобразования. Здесь будут рассмотрены только наиболее характерные, применяемые в телеизмерительной технике. К их числу относится прежде всего способ преобразования по схеме н а п р я ж е н и е — в р е м я — ч и с л о — к о д.

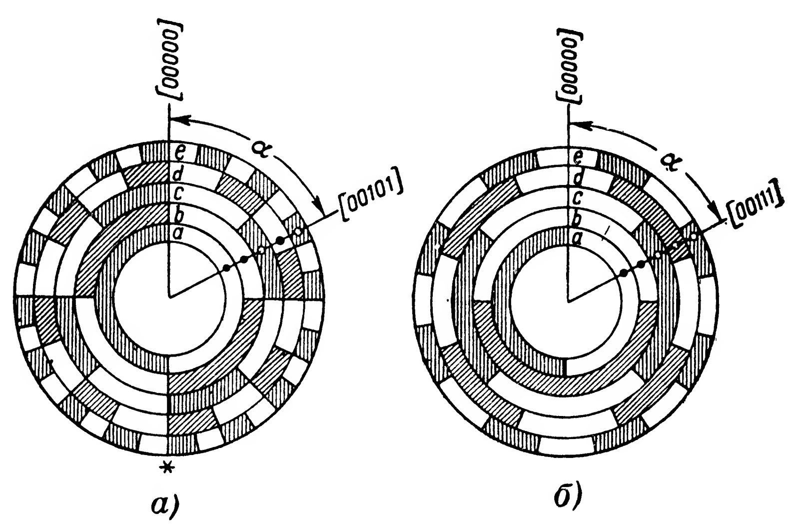


Рис. 24. Преобразователь угла поворота в код с кодирующим диском.
а — для двоичного кода; *б* — для кода Грея.

Сущность этого способа заключается в следующем. При помощи время-импульсного преобразователя кодируемое напряжение u преобразуется в импульс длительностью $t_и$. В течение интервала времени $t_и$ производится подсчет числа импульсов, создаваемых генератором стабильной частоты f. Сосчитанное число импульсов, пропорциональное интервалу $t_и$, а следовательно, и напряжению u, переводится в двоичную или двоично-десятичную систему.

На рис. 25 представлена блок-схема такого преобразователя. Время-импульсный преобразователь *ВИП* обычно выполняется на принципе развертывающего преобразования.

Аналогичным образом может быть построен и преобразователь по схеме н а п р я ж е н и е — ч а с т о т а — ч и с л о — к о д. В этом случае частота импульсов линейно зависит от входного напряжения, а период счета импульсов постоянен.

Применяются также *преобразователи с обратной связью*, основанные на уравновешивании входного напряжения напряжением, пропорциональным сформированному коду. Из преобразователей этой группы наиболее распространены преобразователи с уравновешива-

нием ступенчато-возрастающим напряжением $u_у$, или, как их принято называть, преобразователи по методу „взвешивания"[1]. Кодируемое напряжение $u_{вх}$ сравнивают с суммой ступеней уравновешивающего напряжения $2^{n-1}\Delta u$, $2^{n-2}\Delta u$, ..., $2^1\Delta u$, $2^0\Delta u$, набираемой последовательно в порядке убывания степеней числа 2. При этом

$$u_у = \Delta u \sum_{i=0}^{n-1} l_i 2^i \quad (l_i = 1 \text{ или } 0).$$

Очередная ступень включается в сумму при условии, что уравновешивающее напряжение $u_у$ не превышает входного напряжения $u_{вх}$. Каждой ступени, включенной в сумму, отвечает единица в данном разряде формируемого кода. Передача кода с разделением импульсов во времени может осуществляться в процессе кодирования (набора уравновешивающего напряжения), тогда как в предыдущих случаях передача кода возможна была только по окончании процесса кодирования.

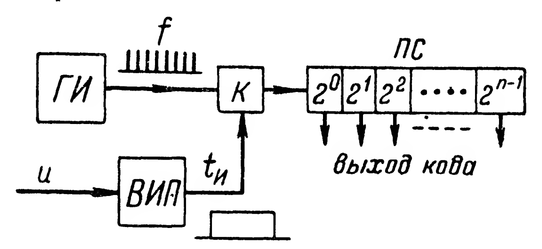


Рис. 25. Блок-схема кодирующего преобразователя счетного типа с промежуточным время-импульсным преобразованием.

ГИ — генератор счетных импульсов; *ВИП* — время-импульсный преобразователь; *К* — ключ; *ПС* — пересчетная схема.

Принцип реализации преобразователя поясняет блок-схема на рис. 26,*а*. Генератор тактовых импульсов *ГИ* управляет распределителем *Р*. Последний поочередно включает ячейки схемы памяти *СП*. Схема памяти воздействует на дешифратор *Д*, формирующий ступени уравновешивающего напряжения $u_у$. Принцип действия дешифратора будет пояснен позднее. Напряжения $u_{вх}$ и $u_у$ сравниваются нуль-органом *НО*. Очередная ячейка памяти, а следовательно, и ступень уравновешивающего напряжения остаются включенными, если $u_{вх} \geqslant u_у$; при $u_{вх} < u_у$ нуль-орган отключает включенную на данном шаге распределителя ячейку памяти. Если ячейка памяти осталась включенной, то схема совпадения *СС* выдает импульс очередного разряда кода. Для примера на рис. 26,*б* и *в* даны графики процесса кодирования ($u_{вх}=7$) при четырехразрядном коде и выходного сигнала.

[1] Такое название основано на сходстве процесса уравновешивания напряжений с процессом уравновешивания взвешиваемого груза при помощи гирь: гири подбирают в порядке убывания их весов.

Другая разновидность преобразователя с обратной связью построена на счетно-импульсном принципе (рис. 27). Здесь на пересчетную схему *ПС* поступают импульсы, посылаемые генератором *ГИ*. Пересчетная схема строится по двоичной (или двоично-десятичной) системе. Выходы пересчетной схемы управляют дешифратором, ступени которого вырабатывают напряжения, пропорциональные разрядам двоичного числа сосчитанных импульсов. Сум-

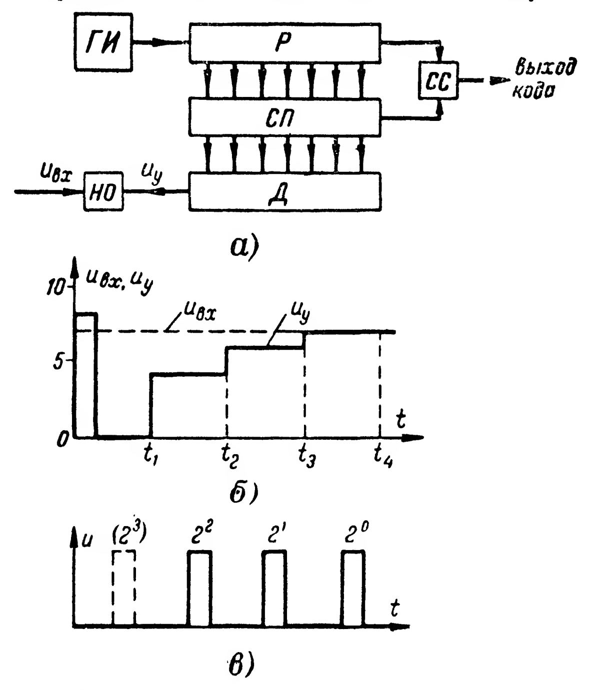


Рис. 26. Кодирующий преобразователь по методу «взвешивания».

а — блок-схема; *б* — диаграмма процесса кодирования; *в* — диаграмма сигнала в канале связи.

марное напряжение $u_у$ дешифратора *Д* сравнивается нуль-органом *НО* с входным напряжением $u_{вх}$. Когда напряжение $u_у$ возрастает до величины $u_{вх}$, нуль-орган отключает ключ *К*, прекращая счет импульсов. Таким образом, пересчетная схема остается в положении, соответствующем числовому значению $u_{вх}$. Код снимается с ячеек пересчетной схемы после окончания процесса кодирования.

Декодирование. Способ декодирования зависит от выбранной формы воспроизведения показаний: аналоговой или цифровой. При аналоговой форме воспроизведения показаний код преобразуется в непрерывную электрическую величину (ток или напряжение), измеряемую выходным прибором. При цифровом воспроизведении

показаний световые или электромеханические индикаторы непосредственно фиксируют числовое значение измеряемого параметра, представленное кодом. Отсчет показаний в двоичной или двоично-десятичной форме затруднен, так как, во-первых, эти системы счисления для нас непривычны, а, во-вторых, число разрядов этих систем счисления в 3—4 раза больше, чем в десятичной. Поэтому обычно при декодировании переходят к десятичной системе.

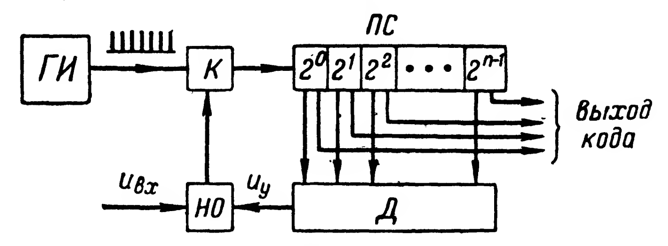


Рис. 27. Блок-схема кодирующего преобразователя счетно-импульсного типа с обратной связью.

ГИ — генератор счетных импульсов; *К* — ключ; *ПС* — пересчетная схема; *Д* — дешифратор; *НО* — нуль-орган.

а) *Преобразователь кода в аналоговую форму* (аналоговый дешифратор). Чаще встречается преобразователь на принципе суммирования токов (рис. 28). Здесь в виде ключей $K_0, \ldots, K_4$ изображены коммутирующие элементы (обычно бесконтактные), кото-

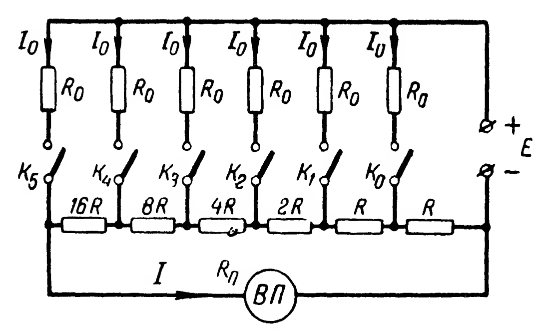


Рис. 28. Схема аналогового дешифратора.

рые замыкают ветви цепи при приеме соответствующих разрядов кода (в данном случае — двоичного пятиэлементного $2^0, 2^1, \ldots, 2^4$). При соблюдении условия $R_0 \gg R \gg R_п$ результирующий ток равен сумме составляющих, пропорциональных разрядам кода:

$$I = \frac{E}{2^n R_0} \sum_{i=0}^{n-1=4} l_i 2^i \ (l_i = 1 \text{ или } 0).$$

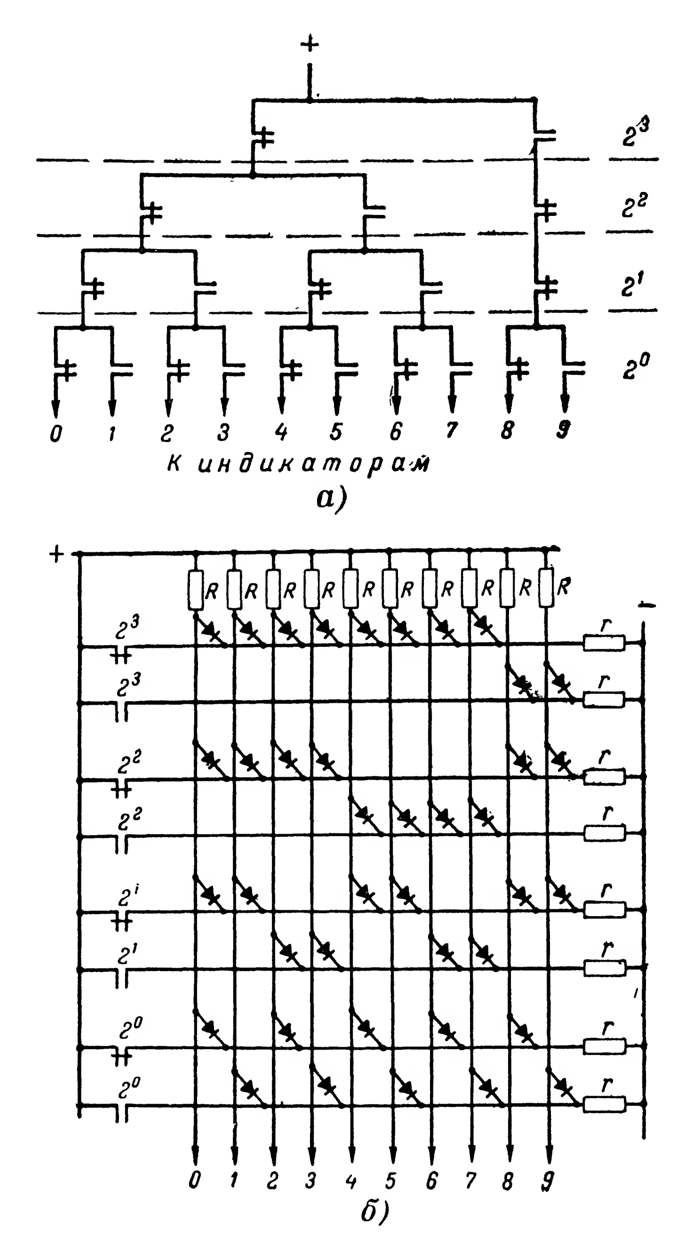


Рис. 29. Дешифраторы двоично-десятичного кода.
а — контактный; *б* — матричный.

Имеются и другие аналоговые дешифраторы.

Аналоговые дешифраторы такого типа применяются также в цепях обратной связи преобразователей кодирующих устройств, схемы которых разобраны выше.

б) *Декодирующее устройство для перевода двоично-десятичного кода в десятичную форму* (цифровой дешифратор). Такое устройство применяется при цифровом воспроизведении показаний. Простейшая схема цифрового дешифратора для одного десятичного разряда, построенная на электромагнитных реле, приведена на рис. 29,*а*. Каждому двоичному коду здесь отвечает один из десяти выходов.

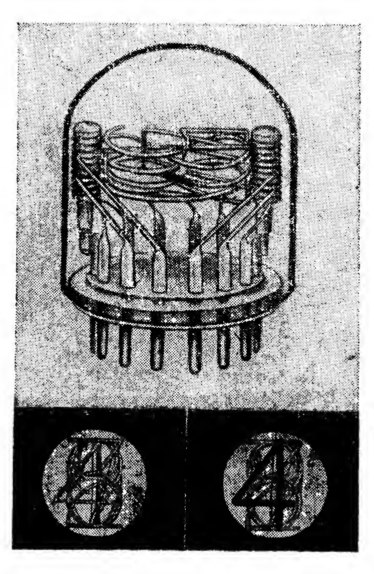


Рис. 30. Цифровая газонаполненная лампа.

Аналогичное назначение имеет и схема в виде диодной матрицы с четырьмя входами (2^3, 2^2, 2^1, 2^0) и десятью выходами (0, 1, ..., 9), показанная на рис. 29,*б*. Здесь в цепи выходов (вертикальные шинки) включены большие сопротивления R. При отсутствии управляющего потенциала на горизонтальной шинке диоды, связывающие эту горизонтальную шинку с вертикальными, открыты; через небольшое сопротивление r ($r \ll R$) соответствующие вертикальные шинки соединены с минусом источника питания, так что напряжения на выходах близки к нулю. При подаче управляющего потенциала все эти диоды запираются. Если диоды, соединенные с данной вертикальной шинкой, заперты, то на выходе возникает рабочее напряжение.

Как нетрудно проследить по схеме, напряжения на выходах возникают при приеме кодов с соответствующими числовыми значениями (0000 — выход 0; 0001 — выход 1; 0010 — выход 2 и т. д.).

Следует заметить, что перевод двоичного кода в десятичную форму, когда число разрядов больше четырех, не может быть выполнен столь просто. Это и заставляет отдать предпочтение двоично-десятичному коду.

Для цифрового воспроизведения показаний применяются различные по принципу действия и конструкциям индикаторы. Особенно распространены цифровые многоэлектродные газонаполненные лампы, в которых при подключении одного из катодов освещается соответствующая цифра (рис. 30). Применяются также мозаичные цифровые индикаторы с просвечиваемыми лампами накаливания элементами; примерный вид мозаики и способ изображения цифр показаны на рис. 31. Последнее время устанавливаются также мозаичные индикаторы с люминесцентными светящимися элементами, которые питаются переменным напряжением повышенной частоты.

Наиболее четкое изображение цифр обеспечивает проекционный индикатор, в котором на общее поле — матовое стекло — проектируются изображения цифр одной из миниатюрных оптических систем с индивидуальными осветительными лампами.

При воспроизведении как в цифровой, так и в аналоговой формах приемные устройства обладают свойством «памяти»: при отсутствии сигналов сохраняются показания, отвечающие ранее принятому коду; показания изменяются только при получении кода, отличающегося от предыдущего. Это свойство весьма полезно для повышения помехоустойчивости телеизмерительной системы и вместе с тем позволяет осуществить циклическую передачу кодов со значительным интервалом между сигналами.

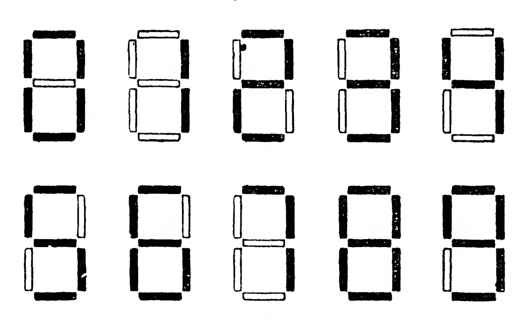


Рис. 31. Мозаичные цифровые индикаторы.

В заключение следует отметить, что воспроизведение показаний в цифровой форме применяется в телеизмерительных системах не только с дискретными, но и с аналоговыми сигналами. В системах интенсивности при этом на приемной стороне используется преобразователь тока или напряжения в код по одной из описанных выше схем. Преобразование непрерывного сигнала в цифровую форму значительно проще реализуется во время-импульсных и частотных системах. В первом случае (время-импульсный сигнал) принцип преобразования аналогичен применяемому в кодирующем устройстве счетного типа (см. рис. 25): происходит подсчет числа импульсов фиксированной частоты, поступающих в течение длительности импульса $t_и$. Во втором случае (частотный сигнал) эта схема инверсируется: производится подсчет числа периодов сигнала за фиксированный интервал времени.

3-4. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Нередко необходимо передавать значения нескольких контролируемых параметров из одного пункта. В этом случае может оказаться целесообразным объединение всех необходимых блоков приема и передачи в единую многоканальную телеизмерительную систему, обслуживающую всю группу контролируемых параметров.

Многоканальные телеизмерительные системы выполняются на принципах как частотного, так и временнóго разделения сигналов.

При *частотном разделении* общий сигнал состоит из группы колебаний несущих частот $f_1, \ldots, f_n$ (по числу контролируемых параметров). Напряжения передатчиков телеизмерения (рис. 32) модулируют колебания генераторов $Г_1, \ldots, Г_n$ несущих частот. Модулированное колебание каждого генератора проходит полосовой фильтр ($Ф_1, \ldots, Ф_n$) и поступает в групповой усилитель $ГУ_{I}$. На приемной стороне общий сигнал снова усиливается в групповом усилителе $ГУ_{II}$ и разделяется на отдельные модулированные коле-

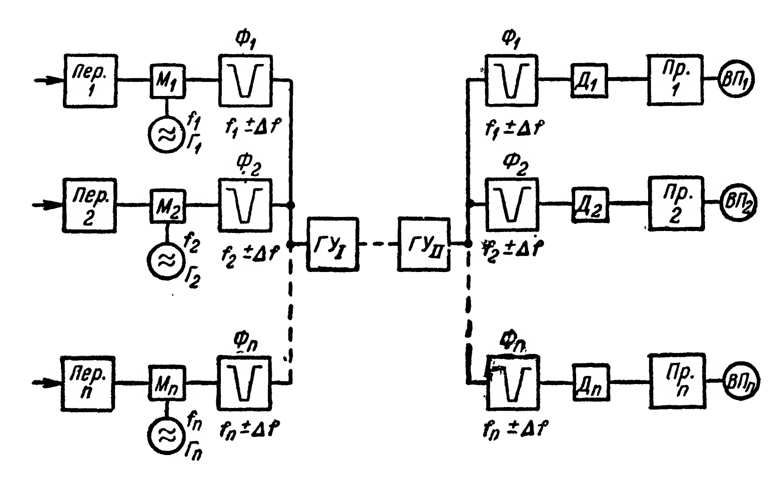


Рис. 32. Блок-схема многоканальной телеизмерительной системы с частотным разделением.

$Г_1, Г_2, \ldots, Г_n$ — генераторы несущих колебаний; $Ф_1, Ф_2, \ldots, Ф_n$ — полосовые фильтры; $М_1, М_2 \ldots, М_n$ — модуляторы; $Д_1, Д_2, \ldots, Д_n$ — демодуляторы; $ГУ_{I}, ГУ_{II}$ — групповые усилители; $Пер_1, Пер_2, \ldots, Пер_n$ — передатчики телеизмерений; $Пр_1, Пр_2, \ldots, Пр_n$ — приемники телеизмерений; $ВП_1, ВП_2, \ldots, ВП_n$ — выходные приборы.

бания фильтрами $Ф_1, \ldots, Ф_n$. Модулированные колебания детектируются в демодуляторах $Д_1, \ldots, Д_n$ и поступают на входы приемников телеизмерения соответствующих каналов.

Общая ширина полосы пропускания многоканальной системы должна быть равна сумме полос частотных спектров сигналов в отдельных каналах (полоса частотного спектра сигнала определяется видом модуляции и скоростью изменения контролируемого параметра) плюс защитные интервалы между полосами частот соседних каналов, необходимые для устранения взаимного влияния каналов.

Как показывает схема на рис. 32,*в* многоканальной системе с частотным разделением собственно телеизмерительные устройства идентичны применяемым в одноканальных системах. Таким образом, многоканальное исполнение относится к аппаратуре системы связи.

Число каналов ограничивается, в частности, перекрестными помехами. Последние возникают при наличии в тракте передачи нелинейных элементов. В результате, кроме колебаний несущих f_1, f_2, f_3... и боковых частот, создаются гармоники несущих nf_1, nf_2, nf_3... и боковых частот и, кроме того, колебания с частотами типа линейных комбинаций $k_1f_1 \pm k_2f_2 \pm k_3f_3 \pm \ldots$, где k_1, k_2, k_3... — целые числа. С увеличением числа несущих частот быстро растет число комбинационных частот, что увеличивает вероятность попадания перекрестных помех в соседние каналы. Тем не менее удается выполнить многоканальные системы с частотным разделением на большое число каналов.

В системах с *временным разделением* применяется коммутация каналов синхронно переключающимися распределителями. В промышленных телеизмерительных системах, рассчитанных на длительную работу, устанавливаются, как правило, бесконтактные распределители. Обычно выбирается циклическая синхронизация распределителей. В принципе возможны две схемы построения системы. В первом случае (рис. 33,*а*) коммутируются входные сигналы от первичных преобразователей, что позволяет использовать один общий модулятор. Во втором случае (рис. 33,*б*) применяются индивидуальные модуляторы, сигналы коммутируются на выходе модуляторов. Приемное устройство также может быть построено либо с общим демодулятором (рис. 33,*а*), либо с индивидуальными демодуляторами (рис. 33,*б*). Хотя устройство по схеме на рис. 33,*а* содержит значительно меньше преобразователей (модуляторов, демодуляторов), реализация его связана с трудностями, так как необходима бесконтактная коммутация сигналов постоянного тока.

Наиболее удачно в многоканальных системах с временным разделением применяются широтно-импульсная и фазо-импульсная модуляции, а также передача кодовых сигналов. Частотный метод используется относительно реже, причем с соблюдением условия $F \gg 1/T_к$, где F — наибольшая частота спектра сигнала, а $T_к$ — промежуток времени, отводимый на передачу по одному каналу.

На рис. 34 для примера представлены сигналы четырехканальной системы с широтно-импульсной модуляцией. Синхронизирующий импульс $t_с$ отличается от измерительных импульсов большей длительностью.

Многоканальные телеизмерительные системы с временным разделением обладают некоторыми преимуществами по сравнению с системами с частотным разделением. Существенно, что по линии одновременно передается только один сигнал, в котором и сосредоточена вся энергия. Это увеличивает отношение напряжения сигнала к напряжению помехи при ограниченной мощности передачи (обычно ограничение устанавливается из условия допустимого влияния на соседние линии связи). По той же причине отсутствуют и перекрестные помехи от комбинационных частот, характерные для частотного разделения. Отсутствие фильтров значительно упрощает конструирование аппаратуры. Существенно также значительное сокращение числа индивидуальных блоков (в особенности при реализации схемы по рис. 33,*а*), хотя эта особенность заметно сказывается при числе контролируемых параметров не менее 4—7.

Наряду с отмеченными преимуществами системы с временным разделением обладают и недостатками. Прежде всего к ним относится усложнение общей части аппаратуры за счет распределите-

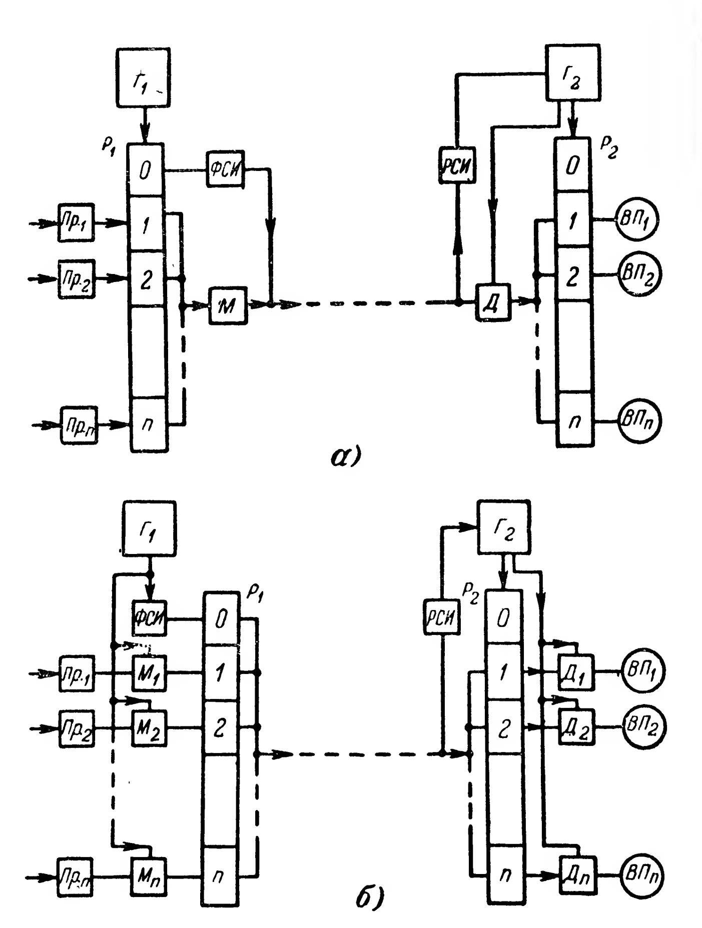


Рис. 33. Блок-схемы многоканальных телеизмерительных систем с временным разделением.

а — система с общими модулятором и демодулятором; *б* — система с индивидуальными модуляторами и демодуляторами. $Г_1$, $Г_2$ — генераторы тактовой частоты; $Р_1$, $Р_2$ — распределители; *М* — модуляторы; *Д* — демодуляторы; *ФСИ* — формирователь синхронизирующего импульса; *РСИ* — различитель синхронизирующего импульса; *Пр* — первичные преобразователи; *ВП* — выходные приборы.

лей и узлов синхронизации. Взаимное влияние соседних каналов не может быть полностью исключено. Надежность систем с временным разделением несколько ниже, чем систем с частотным разделением, так как первые содержат больше общих узлов, а при повреждении любого общего узла прекращается работа всей системы. Поэтому при выборе способа разделения нужно учитывать конкретные условия выполнения и эксплуатации телеизмерительной системы.

Особую группу составляют системы с временным разделением для обслуживания рассредоточенных объектов контроля. В таких системах информация передается с ряда пунктов, на каждом из

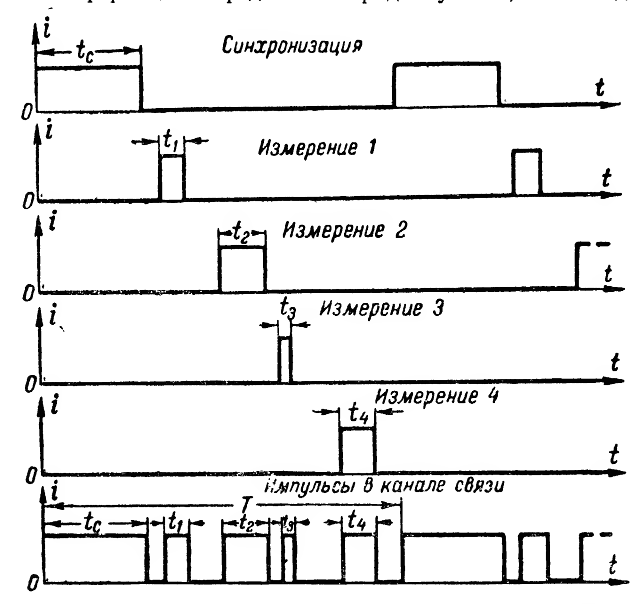


Рис. 34. Диаграмма сигналов четырехканальной системы с временным разделением и широтно-импульсной модуляцией.

которых имеется несколько контролируемых параметров. Задача синхронизации усложняется; необходимо обеспечить заданную последовательность передачи сигналов с территориально разобщенных пунктов. При этом обычные методы синхронизации оказываются недостаточно эффективными и часто не обеспечивают требуемой помехоустойчивости системы. Поэтому в системах с рассредоточенными объектами получила распространение синхронизация с помощью автоматической посылки адресных вызывных сигналов, вырабатываемых на приемном пункте программным устройством. Вызывные сигналы определяют момент начала передачи с очередного контролируемого пункта или очередного контролируемого параметра. Так как связь между контролируемыми и приемными пунктами должна быть двусторонней, то стоимость оборудования связи увеличивается.

Глава четвертая

СИСТЕМЫ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕСИГНАЛИЗАЦИИ

4-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В системах телеуправления и телесигнализации, как уже было пояснено выше, передаются дискретные сообщения: команды управления производственными установками и извещения об изменениях в режиме работы этих установок[1]. Как при телеуправлении, так и при телесигнализации задача сводится к формированию, передаче и расшифровке ограниченного числа дискретных сигналов, отвечающих командам и извещениям. В силу этого методы построения си-

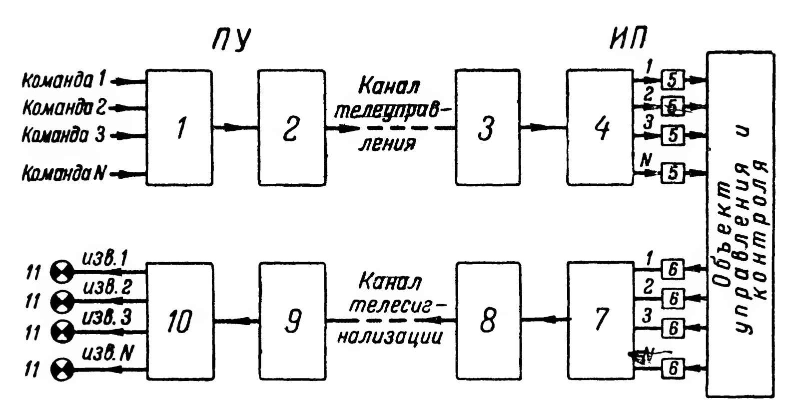


Рис. 35. Обобщенная блок-схема системы телеуправления и телесигнализации.

1 — индивидуальные командные элементы; *2* — формирователь командного сигнала; *3* — избирательное устройство; *4* — индивидуальные элементы исполнения команд; *5* — исполнительные органы; *6* — датчики сигнализации; *7* — индивидуальные элементы сигнализации; *8* — формирователь известительного сигнала; *9* — избирательное устройство; *10* — индивидуальные исполнительные элементы сигнализации; *11* — индикаторы сигнализации.

стем телеуправления и телесигнализации аналогичны. Более того, обычно функции телеуправления и телесигнализации выполняются общими установками. Поэтому в дальнейшем системы телеуправления и телесигнализации будут рассматриваться обобщенно с выделением лишь элементов, специфичных для телеуправления или телесигнализации.

В общем случае система телеуправления и телесигнализации может быть представлена блок-схемой на рис. 35.

---

[1] Значительно реже (в основном при управлении движущимися объектами) передаются непрерывные команды (сообщения). По способу передачи сигналов такие системы сходны с системами телеизмерения.

Посылка команд с пункта управления *ПУ* осуществляется воздействием (вручную или от датчика) на индивидуальные командные элементы (блок *1*). В блоке формирования командного сигнала *2* вырабатывается сигнал, посылаемый по каналу связи на исполнительный пункт *ИП*. Здесь сигнал расшифровывается избирательным устройством *3*, в результате чего срабатывает индивидуальный элемент исполнения команды (блок *4*). Последний действует на соответствующий исполнительный орган *5* объекта управления и контроля (включает или отключает исполнительный механизм, изменяет положение его и т. д.).

Изменения режима объекта (изменение состояния оборудования, достижение предельных значений контролируемыми параметрами и т. п.), в том числе и возникающие после исполнения команды, фиксируются на *ИП* датчиками сигнализации *6* (блок-контактами механизмов, дискретными измерительными датчиками и т. п.). Датчик сигнализации действует на индивидуальный элемент сигнализации (блок *7*). В результате блок формирования известительного сигнала 8 посылает сигнал по каналу связи на *ПУ*. На *ПУ* принятый сигнал расшифровывается избирательным устройством *9*, после чего срабатывает соответствующий данному извещению исполнительный элемент сигнализации *10* и включает индикатор сигнализации *11* (обычно — сигнальную лампу).

Как при телеуправлении, так и при телесигнализации основные функции системы одни и те же: формирование сигналов, число которых равно числу сообщений, передача сигналов по каналу связи и расшифровка сигналов с целью включения исполнительных элементов, отвечающих посланным сигналам; последняя операция носит название *избирания*.

Различают два способа формирования и избирания сигнала:

1. Каждый из n элементов сигнала используется для передачи одного из m сообщений (m — число значений импульсного признака). При этом в каждом сигнале может быть передано n независимых сообщений, а общее число возможных сообщений

$$N = mn.$$

2. Сигналы формируются путем комбинирования всех n элементов сигнала при m значениях импульсного признака, т. е. применяется кодирование сообщений. При этом совокупность всех n элементов сигнала используется для передачи одного сообщения. Общее число возможных сообщений $N = \varphi(n, m)$ зависит от выбранного способа кодирования.

При первом способе формирования сигнала получается многоканальная (n-канальная) система телеуправления, а при втором — одноканальная. Избирание при первом способе формирования сигнала будем называть *прямым*, а при втором—*комбинационным* или *кодовым*.

В дополнение к рассмотренным способам избирания часто применяется *групповой выбор*. Объекты телеуправления и телесигнализации подразделяются на группы, и операции избирания разбиваются на две части: а) выбор группы, к которой принадлежит данный объект, и б) выбор объекта в группе. Иногда число ступеней увеличивают, возможен, например, трехступенчатый выбор: группа — подгруппа — объект.

В случае прямого избирания с групповым выбором сокращается число элементов сигнала, а следовательно, и избыточность его.

Пусть N объектов разбиты на g групп. Тогда общее число элементов сигнала

$$n = n_1 + n_2 = g + \frac{N}{g} < N,$$

где n_1 — число элементов выбора группы;

n_2 — число элементов выбора объекта в группе.

Минимальное число элементов сигнала получается при

$$n_1 = n_2 \approx \sqrt{N},$$

т. е.

$$n_1 = n_2 = \frac{n}{2}.$$

При многоступенчатом выборе (l ступеней) это условие принимает вид

$$n_1 = n_2 = \ldots = n_l \approx \sqrt[l]{N},$$

т. е.

$$n_1 = n_2 = \ldots = n_l = \frac{n}{l}.$$

При комбинационном избирании групповой выбор не сокращает число элементов сигнала, а для некоторых видов кодов, напротив, удлиняет сигнал. В подобных случаях групповой выбор применяется только из конструктивно-схемных соображений.

Дальнейшая классификация систем телеуправления производится по способам разделения элементов сигнала и системам кодирования.

4-2. ЭЛЕМЕНТЫ АППАРАТУРЫ, НЕКОТОРЫЕ ВАЖНЕЙШИЕ УЗЛЫ И БЛОКИ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ

К основным функциональным узлам и блокам устройств телеуправления могут быть отнесены следующие:

1) формирователи импульсных признаков;
2) различители импульсных признаков;
3) шифраторы } — применяются в системах с комбинационным
4) дешифраторы } избиранием;
5) генераторы импульсов } — применяются в системах с времен-
6) распределители } ным разделением;
7) частотные избиратели — применяются в системах с частотным разделением;
8) пусковые узлы — применяются в системах эпизодического действия;
9) выходные блоки управления и сигнализации.

Прежде чем рассмотреть некоторые характерные узлы и блоки устройства телеуправления, ознакомимся с типичными элементами аппаратуры, из которых они комплектуются.

К таким элементам аппаратуры относятся:

1) электромагнитные реле;

2) электромеханические (контактные) шаговые переключатели;

3) магнитные усилители;

4) импульсные бесконтактные элементы с магнитными сердечниками (в сочетании с полупроводниковыми диодами или триодами);

5) электронные лампы и безнакальные ионные приборы;

6) полупроводниковые приборы — диоды и триоды;

7) частотные избиратели с электрическими резонансными контурами;

8) частотные резонансные избиратели электромеханического типа.

Электромагнитные реле. Применяются преимущественно нейтральные (неполяризованные), главным образом слаботочные, электромагнитные реле. Такие реле позволяют реализовать весьма разнообразные функции: усиление и формирование импульсных сигналов, переключение цепей, размножение цепей, элементарные логические функции (И, ИЛИ, НЕ), создание временных задержек, различение сигналов по уровню и длительности, функции дискретной памяти неограниченной длительности и др. Следует отметить, что по функциональным возможностям электромагнитные реле не имеют равных. Это и определило широкое применение их в технике телеуправления.

Вместе с тем приходится учитывать и некоторые недостатки электромагнитных реле, препятствующие совершенствованию характеристик устройств телеуправления. К ним прежде всего относится ограниченное быстродействие: у наиболее распространенных реле телефонного типа время срабатывания не ниже 5—10 *мсек*, время отпускания 7—15 *мсек*, максимальная частота переключений не более 10—15 в секунду; промежуточное реле, устанавливаемое для коммутации цепей относительно большой мощности, обладают еще более низким быстродействием. Срок службы реле ограничен гарантийным числом срабатываний: от 10^5 до 10^7. Реле с открытыми контактами работают ненадежно в условиях повышенной влажности и запыленности окружающего воздуха и в особенности при наличии в воздухе компонентов, способствующих коррозии. Иногда возможность применения электромагнитных реле ограничивается относительно большой мощностью управления, обычно не менее десятых долей ватта.

Вследствие указанных недостатков электромагнитные реле в последние годы интенсивно заменяются бесконтактными элементами. В настоящее время электромагнитные реле сохраняются в устройствах в качестве выходных элементов, управляющих цепями исполнительных механизмов или индикаторов сигнализации, так как переключение выходных цепей производится относительно редко, а требования к быстродействию минимальны.

Нужно отметить, что в настоящее время конструкторы разрабатывают специальные электромагнитные реле с высоким быстродействием и большим сроком службы (реле с герметизированными контактами, безъякорные реле и др.). Успешное завершение их работы может заставить пересмотреть отношение к электромагнитным реле как элементам устройств телеуправления.

Электромеханические шаговые переключатели. К этой категории относятся прежде всего телефонные шаговые искатели с электро-

магнитным приводом (рис. 36). Такие аппараты позволяют осуществлять от 10 до 50 тактов переключения при независимой коммутации от 4 до 6 групп цепей. Скорость действия ограничена: до 30 шагов в секунду. Срок службы 150—300 тыс. обходов. Для управления приводным электромагнитом требуется значительная мощность — до 50 *вт*. Как и электромагнитные реле, электромеханические шаговые переключатели в новых устройствах телеуправления заменяются бесконтактными быстродействующими элементами.

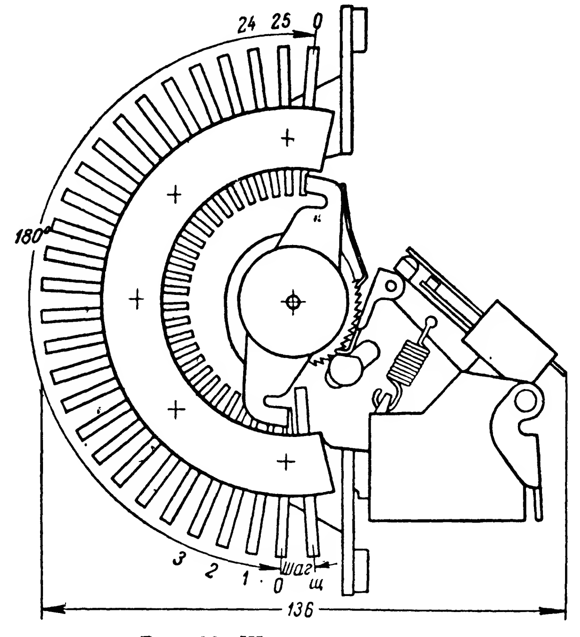


Рис. 36. Шаговый искатель.

Магнитные усилители применяются в устройствах телеуправления главным образом в качестве выходных элементов, заменяя электромагнитные реле и контакторы. Относительно низкое быстродействие магнитных усилителей препятствует использованию их в основных узлах и блоках устройств.

Импульсные бесконтактные элементы с магнитными сердечниками. В различных областях техники управления и вычислительной техники получили широкое распространение бесконтактные элементы с ферромагнитным сердечником, обладающим петлей гистерезиса, близкой по форме к прямоугольной (рис. 37,*а*). Такой элемент представляет собой пассивную ячейку памяти с устойчивыми состояниями «0» ($-B_r$) и «1» ($+B_r$). При перемагничивании сердечника (перевод из состояния «1» в состояние «0» отрицательным полем или, наоборот, положительным) в выходной обмотке элемента индуцируется кратковременный импульс напряжения.

При действии положительного намагничивающегося поля на сердечник, находящийся в состоянии «1», в выходной обмотке индуцируется только небольшой (по величине энергии) импульс помехи, обусловленный неидеальной прямоугольностью петли гистерезиса, и сердечник после снятия намагничивающего импульса сохраняет это состояние. Перевод сердечника из состояния «0» в состояние «1» обычно называют подготовкой сердечника, а перемагничивание из «1» в «0» — считыванием.

В качестве материала сердечника применяются специальные сплавы типа пермаллоя и ферриты. В табл. 7 приведены основные статические параметры наиболее распространенных материалов сердечников.

Таблица 7

Материал, марка	H_c, эрс	B_m, гс	B_r/B_m	Точка Кюри, ° С
Пермаллой Н50П	0,15	15 500	0,92—0,96	—
„ Н65П	0,05	13 500	0,95—0,98	—
Феррит ВТ-2	0,8	2 550	0,94	275
„ ВТ-5	0,15	2 320	0,95	160
„ К-28	1,5	2 800	0,93	290
„ К-65	0,4	2 500	0,95	150
„ К-132	0,2	2 200	0,9	150

H_c — коэрцитивная сила;
B_r — остаточная индукция ($H = 0$);
B_m —индукция насыщения ($H = 5H_c$).

Функциональные возможности импульсных бесконтактных элементов с магнитными сердечниками весьма широки, в частности в блоках пассивной памяти, переключающих ячейках, элементах, реализующих логические функции, формирователях импульсов и т. п.

Типовая схема элемента с диодами в цепях переноса и выхода показана на рис. 37,*б*. Применение таких элементов будет пояснено при рассмотрении схем бесконтактных распределителей.

Иногда схема с диодом заменяется схемой с полупроводниковым триодом (рис. 38). Здесь при считывании отпирается триод T и благодаря наличию положительной обратной связи $w_{о.с}$, коллекторный ток $I_к$ лавинообразно нарастает, ускоряя процесс перемагничивания.

У этого элемента, получившего название *ферротранзисторного*, получается на выходе импульс большей энергии, чем у элемента по схеме на рис. 37,*а*.

Элементы на электронных лампах, безнакальных тиратронах и полупроводниковых приборах. Универсальность этих элементов позволяет построить из них практически все необходимые функциональные узлы и блоки устройств телеуправления. Однако электронные лампы в промышленных устройствах телеуправления практически не используются, что обусловлено в основном ограниченным сроком службы ламп (от сотен до тысяч часов). Малогабаритные

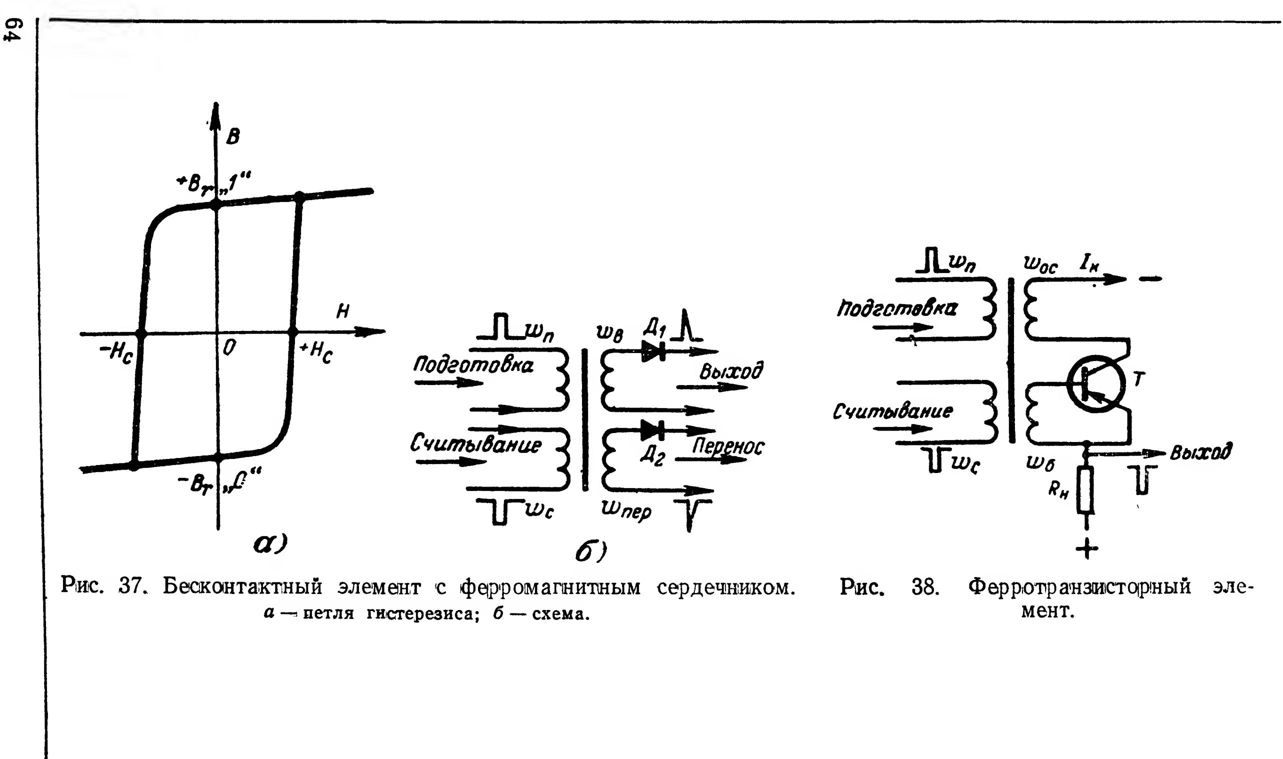


Рис. 37. Бесконтактный элемент с ферромагнитным сердечником. *а* — петля гистерезиса; *б* — схема.

Рис. 38. Ферротранзисторный элемент.

безнакальные тиратроны применяются преимущественно во вспомогательных узлах.

Наибольшее распространение получили полупроводниковые триоды и диоды. Созданы устройства телеуправления, выполненные полностью на этих элементах. В последнее время специальные полупроводниковые приборы — управляемые кремниевые вентили — заменяют магнитные усилители в выходных элементах для управления мощными исполнительными цепями. Существенно, что управляемые кремниевые вентили обладают значительно меньшими габаритами и весом, чем магнитные усилители.

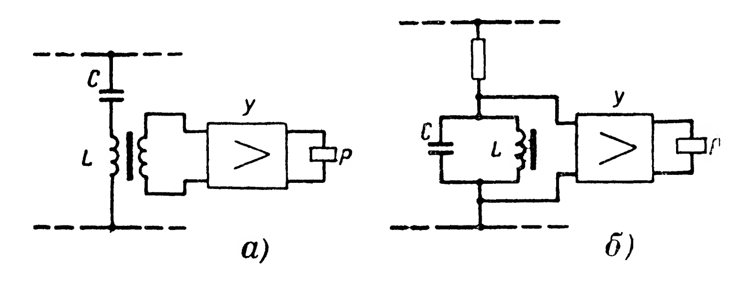


Рис. 39. Применение последовательного (*а*) и параллельного (*б*) резонансных контуров в качестве частотных избирателей.

Частотные избиратели. Частотные избиратели построены на принципе либо электрического резонанса (электрические избиратели), либо механического (электромеханические избиратели). Простейшим ***электрическим избирателем*** является последовательный или параллельный резонансный контур, иногда в сочетании с усилителем (рис. 39).

В диапазоне тональных частот вследствие недостаточной избирательности резонансного контура применяют полосовые электрические фильтры — обычно простейшие, одно- или двухзвенные. Для сравнения на рис. 40 показаны частотные характеристики (отношение напряжений на входе U_1 и выходе U_2) контура с резонансной частотой f_0 и двухзвенного полосового фильтра (звенья типа m и k) с катушками индуктивности одинаковой добротности. Преимущества полосового фильтра очевидны. Практически полосовые фильтры для тональных частот выполняют с полосой пропускания $f_2 - f_1$ от 50—60 *гц* и более.

Из числа ***электромеханических избирателей*** применяют камертонные (рис. 41,*а*) и язычковые (рис. 41,*б*) резонансные избиратели. Частотные характеристики таких избирателей подобны характеристике колебательного контура той же добротности. Добротность электромеханических избирателей обоих типов велика (около 1 000). Поэтому полоса пропускания оказывается чрезмерно узкой ($\sim 0{,}001 f_0$), что недопустимо увеличивает время нарастания колебаний на выходе избирателя и требует весьма высокой стабильности настройки как избирателя, так и генератора. Поляризованные электромагнитные системы в цепях возбуждения механических ко-

лебаний и съема сигнала (рис. 41) оказывают демпфирующее действие. В результате полоса пропускания расширяется примерно до $0{,}01f_0$.

Наряду с рассмотренными простейшими электромеханическими избирателями применяются более сложные механические колебательные системы с несколькими степенями свободы. Частотные ха-

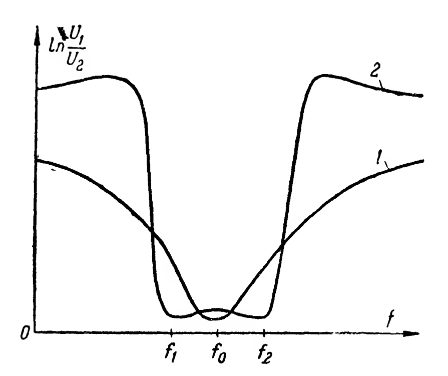


Рис. 40. Частотные характеристики резонансного контура (*1*) и полосового фильтра (*2*).

рактеристики таких избирателей подобны характеристикам полосовых фильтров.

Рассмотрим теперь типовые и наиболее специфичные узлы и блоки устройств телеуправления: шифраторы, дешифраторы и распределители.

Шифраторы. На рис. 42,*а* представлена обычная схема шифратора двоичного кода с многоконтактными кодирующими ключами. Схема построена для трехэлементного кода ($n=3$; $N=8$). Шинки

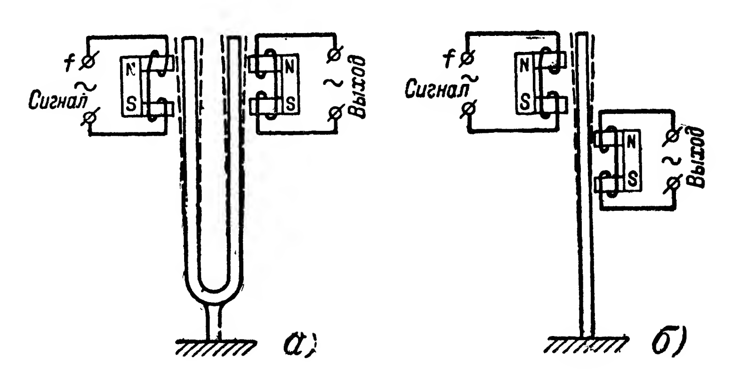


Рис. 41. Электромеханические резонансные избиратели.
а — камертонный; *б* — язычковый.

z_a и z_b образуют цепи формирования значений импульсного признака «0» и «1». При нажатии одного из ключей замыкаются цепи формирования импульсов кода, отвечающие порядковому номеру ключа (1К—000, 2К—001, 3К—010 и т. д.).

В некоторых случаях для уменьшения числа контактов у ключей применяются шифраторные схемы с диодами. Пример такой

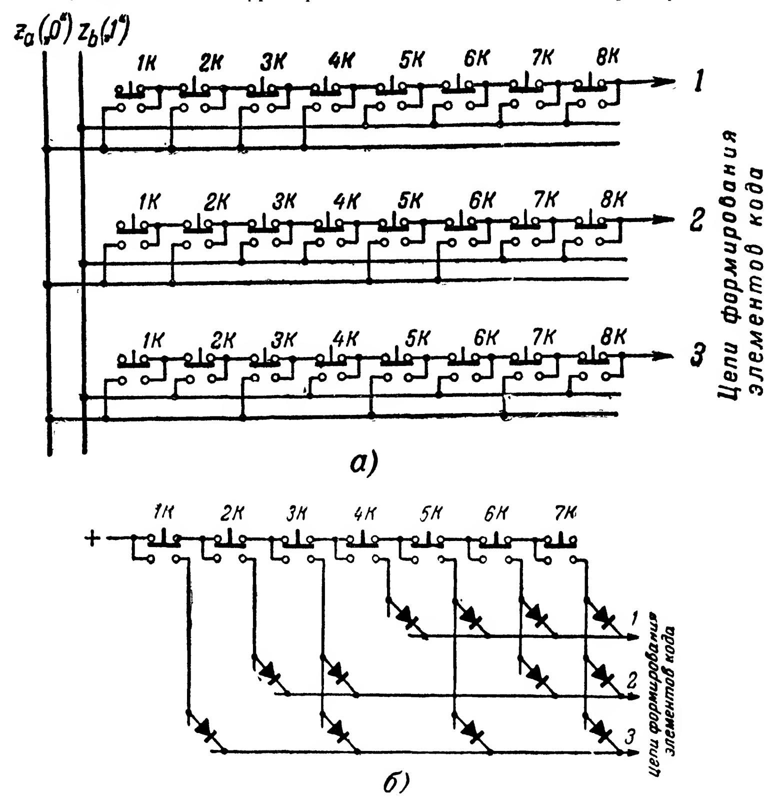


Рис. 42. Схемы шифраторов двоичного кода.

а — с многоконтактными кодирующими ключами; *б* — с диодами.

схемы для формирования двоичного кода с передачей сигнала по принципу наличия или отсутствия импульса представлен на рис. 42,*б* (комбинация 000 для передачи сигнала не используется).

Аналогичным образом строятся шифраторы и для кодов других типов.

Дешифраторы. Наиболее распространены дешифраторы на электромагнитных реле. При кодах с $m=2$ для каждого элемента сигнала необходимы два реле, фиксирующие значения импульсного признака. Контакты фиксирующих реле образуют дешифраторную

схему. Простейшая дешифраторная схема для трехэлементного двоичного кода приведена на рис. 43,*а*. Номерные обозначения фиксирующих реле записаны по следующей системе: первая цифра указывает номер элемента кода, а вторая — значение импульсного признака (0; 1). Так, например, реле 3-го импульса, фиксирующего «0,» обозначается *30*, а реле этого же импульса, фиксирующее «1», — *31*.

В бесконтактных устройствах телеуправления часто применяются диодные дешифраторы на принципе схем совпадения с двумя и более входами. Принцип действия их уже был рассмотрен в § 3-3. На рис. 43,*б* показана в качестве примера бесконтактная дешифраторная схема для кода на одно сочетание типа C_5^2 $(N=10)$.

Фиксирующие элементы изображены здесь условно в виде контактов реле *11*, *21*, *31*, *41*, *51*, замыкающихся при приеме «единицы» на соответствующем элементе кода. В действительности напряжение на горизонтальные шинки подается бесконтакными фиксирующими элементами. Каждая выходная цепь содержит диодную схему совпадения с двумя входами. Сопротивления схемы выбраны из условия $R \gg r$. При приходе двух «единиц» на выходе соответствующей схемы совпадения возникает напряжение, так как оба диода запираются; например, при срабатывании реле *51* и *41* возникает напряжение на выходе *1*.

Распределители. В устройствах телеуправления с релейно-контактной аппаратурой распределителями служат либо телефонные шаговые искатели, либо релейные распределители. Последние представляют собой счетные схемы из реле.

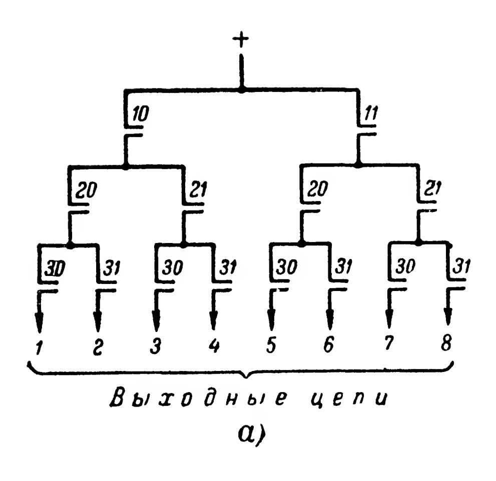
Применяются две разновидности релейных распределителей: двухтактные и однотактные. Первые отсчитывают как импульсы, так и интервалы (паузы) между ними, вторые отсчитывают только импульсы (или только паузы).

На рис. 44,*а* показана схема двухтактного релейного распределителя. В этой схеме при периодическом переключении контактов управляющего реле *П* (т. е. как при срабатывании, так и при отпускании реле) происходят поочередные включение следующего по порядку реле-счетчика *С* и отключение предыдущего. Контакты реле *С* переключают цепи передачи или приема сигналов (рис. 44,*б*).

Однотактный распределитель (рис. 44,*в*) выполнен по более сложной схеме. Цепи реле-счетчиков *С* разделены на нечетные и четные при помощи двухобмоточного реле (обмотки обозначены P_{I} и P_{II}). Реле *Р* работает черед два такта: включено во время нечетного импульса и следующей за ним паузы и отключено на четных импульсе и паузе. Благодаря такому построению схемы очередное реле *С* срабатывает на паузе после отсчитываемого импульса и отключает предыдущее. Таким образом, реле *С* включаются поочередно в порядке их номеров. Число переключаемых цепей равно числу отсчитываемых импульсов.

Из числа бесконтактных распределителей рассмотрим схему на магнитных элементах с прямоугольной петлей гистерезиса. Такие схемы, как и релейные, строятся как однотактными, так и двухтактными. На рис. 45,*а* представлена схема двухтактного распределителя, аналогичного по функциям релейному по схеме на рис. 44,*а*.

Принцип действия схемы на рис. 45,*а* следующий. Каждый сердечник имеет четыре обмотки: обмотку подготовки w_1, обмотку считывания w_2, обмотку переноса w_3 и выходную обмотку w_4.



+ R R R R R R R R R R
+ r −
51
41
31
21
11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Выходные цепи

б)

Рис. 43. Схемы дешифраторов.

а — релейно-контактный дешифратор двоичных кодов; *б* — диодный матричный дешифратор кодов типа C_5^2.

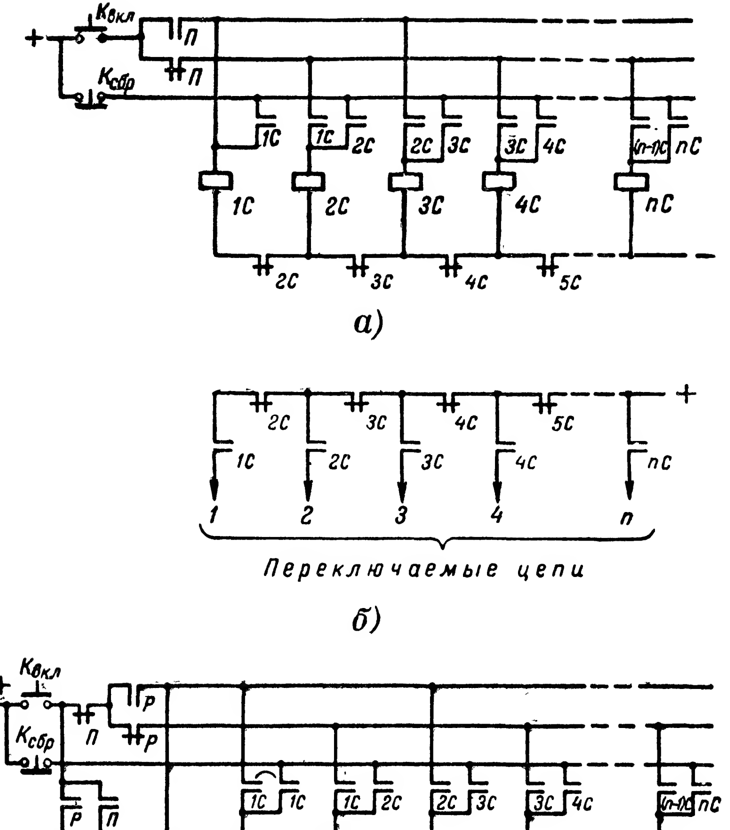
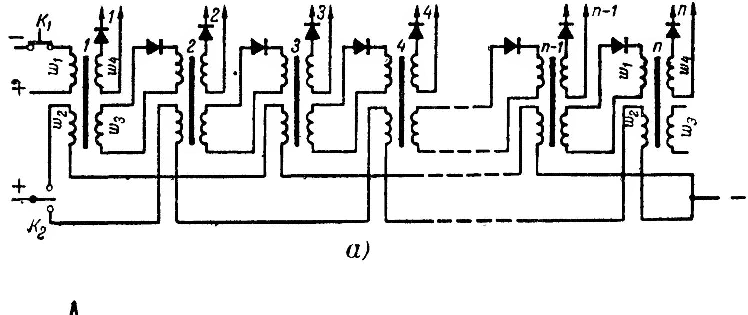


Рис. 44. Схемы релейных распределителей.
а — двухтактная схема; *б* — выходные цепи; *в* — однотактная схема.

В исходном положении все сердечники, кроме первого, находятся в состоянии «0». Первый сердечник подготавливается (переводится в состояние «1») кратковременным нажатием кнопки K_1. Затем переключатель K_2 переводится в верхнее положение и по всем обмоткам нечетных сердечников пропускается считывающий импульс. Однако подготовлен был только сердечник *1*; он перемагничивается, и в его обмотке w_4 возникает выходной импульс. Одновременно от обмотки w_3 сердечника *1* получает импульс подготовки обмотка w_1 сердечника *2*, в результате чего последний переходит в состояние «1».



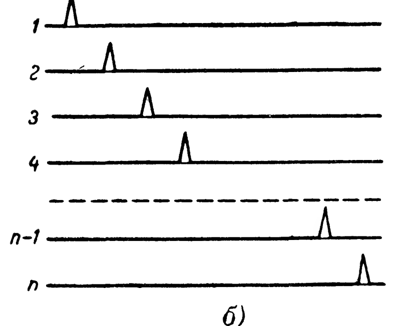


Рис. 45. Бесконтактный распределитель на магнитных элементах с прямоугольной петлей гистерезиса.

а — принципиальная схема; *б* — диаграмма импульсов в выходных цепях.

При переводе переключателя K_2 в нижнее положение сердечник *2* перемагничивается, т. е. переводится в состояние «0», на его обмотке w_4 возникает импульс, а сердечник *3* подготавливается. При повторных манипуляциях с переключателем K_2 аналогично происходят подготовка и считывание у всех остальных сердечников и на их обмотках w_4 возникают выходные импульсы (рис. 45,*б*). Если обмотку w_3 сердечника *n* соединить с обмоткой w_1 сердечника *1*, то распределитель будет непрерывно работать по схеме замкнутого кольца.

В реальных схемах условно изображенные на рис. 45,*а* ключи K_1 и K_2 отсутствуют, а управление распределителем осуществляется от бесконтактных элементов.

На подобном принципе построены и однотактные распределители.

4-3. СИСТЕМЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗДЕЛЕНИЕМ (МНОГОПРОВОДНЫЕ)

Многопроводные системы телеуправления и телесигнализации представляют собой улучшенные системы дистанционного управления. Обычно они выполняются с прямым избиранием. Для сокращения числа соединительных проводов при заданном числе команд и извещений применяется несколько (2—4) значений импульсного признака. Наиболее употребительные импульсные признаки — по-

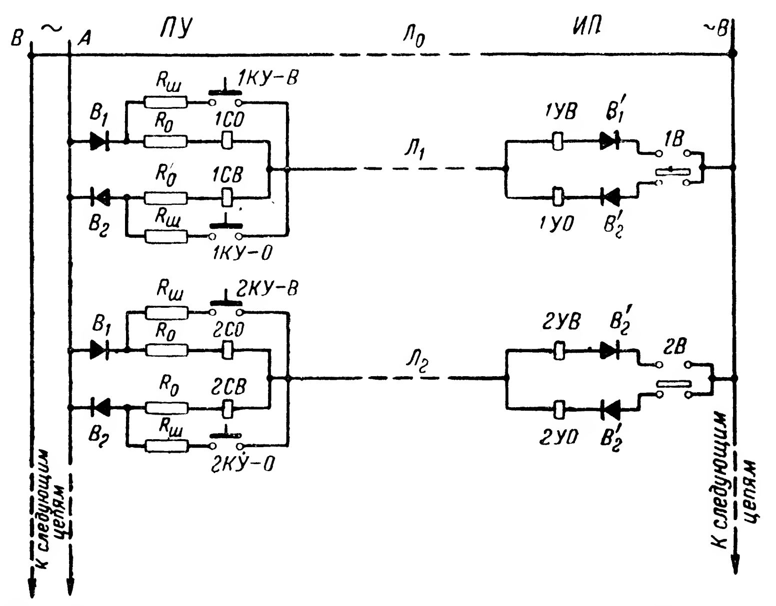


Рис. 46. Схема линейных цепей многопроводной системы телеуправления и телесигнализации.

КУ — ключ управления; *СО* — реле сигнализации позиции «отключено»; *СВ* — то же «включено»; *УВ* — реле управления команды «включить»; *УО* — то же «отключить»; *1В*, *2В* ... — блок-контакты исполнительных механизмов.

лярность ($m=2$) и величина («амплитуда»); для последнего признака обычно выбирают также $m=2$. Используя одновременно полярный и амплитудный признаки, можно увеличить общее число значений импульсного признака до $m=4$.

Пример схемы линейных цепей такой системы показан на рис. 46. Схема построена применительно к телеуправлению и телесигнализации двухпозиционных объектов. Телесигнализация положения объекта осуществляется меньшим током, чем телеуправление. Для этого на пункте управления *ПУ* в цепь реле сигнализации положения объекта (*СО*, *СВ*) введено большое добавочное сопротивление R_0. Положение объекта контролируется на исполнительном пункте *ИП* блок-контактами *1В*, *2В*. Для посылки команды надо

замкнуть контакты ключа *КУ*, т. е. шунтировать катушку реле и добавочное сопротивление R_0 малым сопротивлением $R_ш$ ($R_ш \ll R_0+R_р$), где $R_р$ — сопротивление обмотки реле). В результате ток в линии увеличивается. Реле управления (*УВ*, *УО*) на *ИП* срабатывают только при большом токе. Цепи управления и сигнализации противоположных позиций («включить — отключить» и «отключено — включено») питаются полуволнами разных знаков выпрямленного переменного тока. Таким образом, по каждому проводу передаются четыре сигнала: две команды и два извещения.

Увеличение числа проводов линии связи с увеличением числа объектов управления и контроля делает многопроводные системы неэкономичными при расстоянии более 1 *км*, в особенности при большом числе объектов.

4-4. СИСТЕМЫ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

Системы этого вида получили распространение преимущественно для телемеханизации рассредоточенных объектов. Простейшая разновидность таких систем телеуправления — *система с индивидуальными частотами*, т. е. с прямым избиранием. Здесь каждой команде-извещению отвечает определенная частота сигнала. При этом импульсные признаки не используются. Таким образом, число частот n равно общему числу команд и извещений N.

Подобный принцип выполнения системы телеуправления обладает двумя принципиальными недостатками: а) велико число частот сигналов, что требует расширения полосы пропускания и диапазона рабочих частот, и б) низка помехоустойчивость, так как появление помехи со спектром, содержащим частоты, близкие к любой из рабочих частот, приводит к ошибке.

Значительно большее признание получили *комбинационные системы*. Обычно в системах этого типа применяются коды C_n^2, т. е. коды с параллельной посылкой сигналов двух частот при общем числе рабочих частот n. Выбор такой системы кодирования определяется двумя соображениями. Во-первых, стремятся сократить число возможных частотных составляющих при перекрестной модуляции: при двухчастотном сигнале число комбинационных частот, попадающих в диапазон рабочих частот, минимально. Во-вторых, при двухчастотных кодах крайне просто выполняется дешифратор, состоящий в предельном случае из N схем совпадения. Правда, приходится мириться с увеличением избыточности при $n>5$ и комбинировании по два по сравнению с оптимальным комбинированием (например, для четного n оптимальный код $C_n^{n/2}$).

Рабочие частоты, как правило, выбираются в тональном диапазоне.

На рис. 47 показана блок-схема системы телеуправления и телесигнализации с частотным разделением и комбинационным избиранием (код C_5^2). Система выполнена для рассредоточенных двухпозиционных объектов. С пункта управления *ПУ* сигнал переключения объекта посылается при нажатии ключа, соответствующего *К*. В результате к усилителю передачи $У_1$ подключаются два генератора *Г* и в линию поступает двухчастотный сигнал. На исполнительном пункте *ИП* установлены полосовые фильтры *ПФ*, пропуска-

ющие сигналы определенных частот. При приеме двухчастотной комбинации посланная команда расшифровывается дешифратором *ДШ* и объект получает управляющий импульс.

Телесигнализация положения объекта посылается автоматически при его переключении. В течение заданного промежутка време-

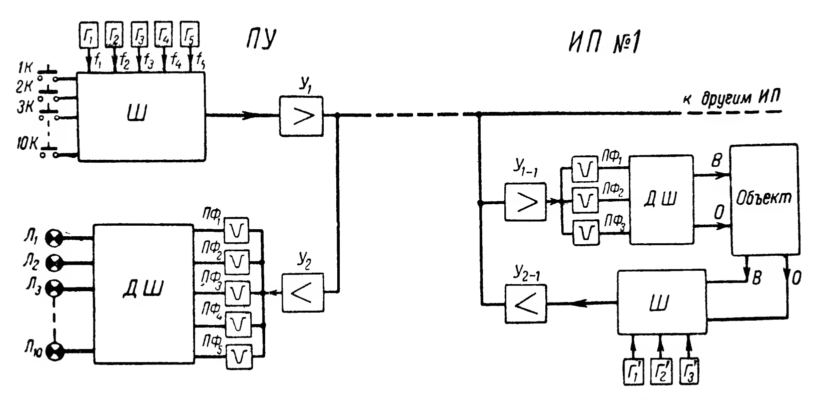


Рис. 47. Блок-схема системы телеуправления и телесигнализации с частотным разделением и комбинационным избиранием.

Г — генераторы звуковой частоты; *Ш* — шифраторы; *У* — усилители; *ПФ* — полосовые фильтры; *ДШ* — дешифраторы; *К* — ключи управления; *Л* — лампы сигнализации.

ни к усилителю передачи $У_{2-1}$ подключаются два генератора, формируя двухчастотную комбинацию сигнала. На *ПУ* принятый сигнал разделяется полосовыми фильтрами *ПФ* и расшифровывается дешифратором *ДШ*; на выходе дешифратора срабатывает сигнальное реле, и включается сигнальная лампа нового положения объекта.

4-5. СИСТЕМЫ С ВРЕМЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

Система с временным разделением относится к наиболее универсальным системам телеуправления сосредоточенными объектами. Число модификаций систем этого вида довольно значительно. Отличительными особенностями системы являются: способ синхронизации, метод избирания (прямое или комбинационное), вид импульсного признака, а также способ передачи сигналов (эпизодическая или непрерывная, циклическая, передача).

До последнего времени применялись почти исключительно системы с эпизодической передачей сигналов и пошаговой синхронизацией. Такое решение определялось прежде всего тем, что применялась электромеханическая аппаратура (электромагнитные реле и шаговые искатели). Срок службы электромеханической аппаратуры ограничен допустимым числом срабатываний. Поэтому непрерывная (циклическая) работа системы телеуправления не могла быть допущена.

Успешное внедрение в технику телеуправления новых бесконтактных элементов — полупроводниковых приборов и импульсных

элементов с магнитными сердечниками — устранило эти ограничения, расширив число возможных технических решений.

Предварительно рассмотрим наиболее простые из систем с *эпизодической передачей сигналов*, а именно системы с прямым избиранием, получившие название *распределительных систем.* Для систем этого типа характерна передача на каждом шаге распределителя самостоятельного сигнала. При пошаговой синхронизации каждый импульс выполняет функции как носителя сообщения, так и импульса синхронизации распределителей. Обычно используются два значения импульсного признака (продолжительность импульса или интервала между импульсами или полярность). Одно из двух значений

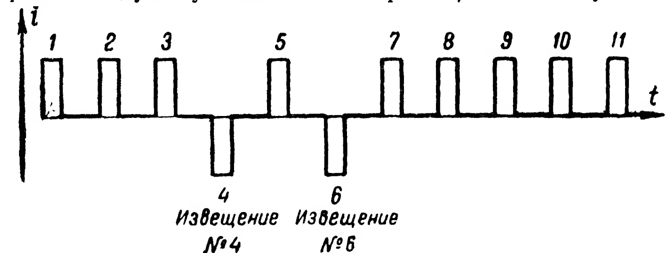


Рис. 48. Диаграмма сигнала распределительной системы с полярным импульсным признаком.

импульсного признака является активным («1») и служит для передачи команды или извещения; распределитель переключается как при активном, так и при пассивном («0») значениях импульсного признака. Пример диаграммы импульсов в канале связи с полярным признаком приведен на рис. 48. Активные отрицательные импульсы передают извещения (№ 4 и 6) и служат одновременно для синхронизации, положительные импульсы пассивны и предназначены только для синхронизации.

Общее число извещений здесь равно числу импульсов, а следовательно, и числу шагов распределителя. Очевидно, что помехоустойчивость такой системы невысока, так как искажение любого импульса приводит к ошибке: образованию ложного сигнала при переходе пассивного импульса в активный или невыполнению сигнала в противоположном случае. Распределительный принцип применяется только при телесигнализации, когда последствия искажения сигнала менее опасны, а передача нескольких извещений за один цикл весьма заманчива.

При телеуправлении вводится ограничение: за цикл передается только одна команда, что дает возможность обнаружить искажение сигнала. Такой способ передачи сигнала не соответствует прямому избиранию и по существу означает применение кодированных сигналов типа C_n^1. В этом случае избыточность неоправданно высока, так как $C_n^1 < C_n^{n/2}$ (последний тип кодов на одно сочетание, как уже отмечалось, имеет минимальную избыточность).

На рис. 49,*а* приведена блок-схема системы телеуправления — телесигнализации эпизодического действия, поясняющая функции и

структуру устройства. Команда с пункта управления *ПУ* передается при включении соответствующего командного ключа *КУ* и кратковременном нажатии пусковой кнопки *ПК*. Последняя включает пусковой элемент $П_1$ и тем самым генератор импульсов $ГИ_1$. Генератор импульсов управляет переключением распределителя $Р_1$ и вместе с тем посылает импульсы в линию для управления распредели-

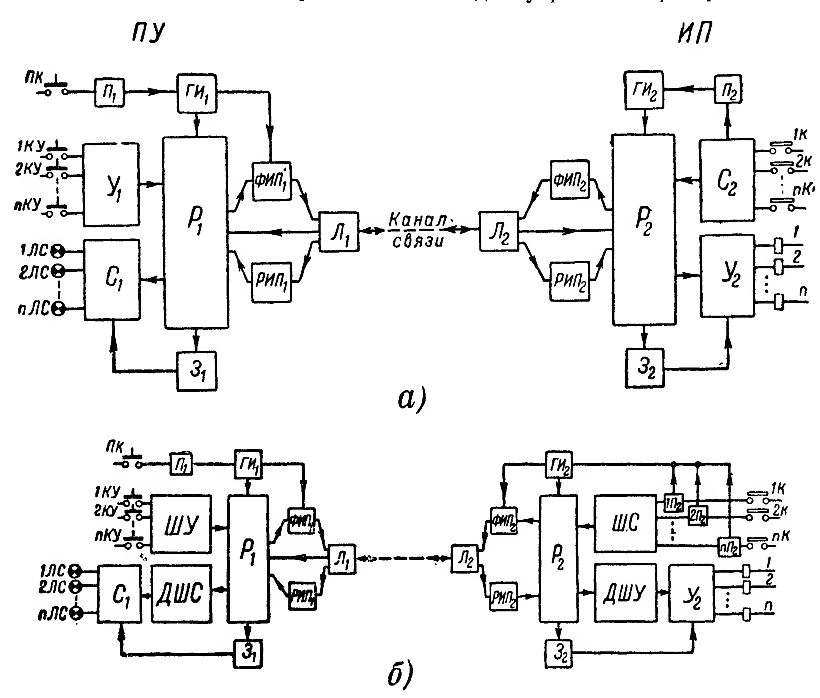


Рис. 49. Блок-схемы систем телеуправления — телесигнализации с временным разделением.

а — распределительная система; *б* — комбинационная система; *КУ* — командные ключи; *ПК* — пусковые кнопки; $У_1$ — индивидуальные командные элементы; *П* — пусковые элементы; *ГИ* — генераторы импульсов; *Р* — распределители; *Л* — линейные узлы; *ФИП* — формирователи импульсного признака; *РИП* — различители импульсного признака; $У_2$ — индивидуальные элементы исполнения команд; *З* — узлы защиты; *К* — блок-контакты исполнительного механизма; $С_2$ — индивидуальные элементы сигнализации; $С_1$ — индивидуальные исполнительные элементы сигнализации; *ЛС* — лампы сигнализации; *ШУ* — шифратор команд; *ШС* — шифратор известительной сигнализации; *ДШУ* — дешифратор команд; *ДШС* — дешифратор известительной сигнализации.

телем $Р_2$, установленным на исполнительном пункте *ИП*. В результате оба распределителя переключаются практически синхронно (точнее, переключения распределителя $Р_2$ запаздывают по сравнению с переключениями распределителя $Р_1$ на время передачи импульса по каналу связи). Распределители поочередно подключают к каналу связи ключи управления *КУ* и исполнительные цепи. При

нажатии одного из ключей управления *КУ* значение импульсного признака изменяется при помощи формирователя импульсного признака $ФИП_1$ и в линию посылается сигнал с активным значением импульсного признака. На *ИП* этот импульс обнаруживается различителем импульсного признака $РИП_2$. В результате на данном шаге образуется цепь для срабатывания в блоке $У_2$ выходного элемента управления, соответствующего переданной команде. Команда выполняется после проверки правильности приема сигнала, осуществляемой узлом защиты $З_2$. Принципы выполнения защит будут пояснены позднее (см. § 4-6).

Передача телесигнализации аналогична передаче команд. Автоматический пуск устройства ($П_2$, $ГИ_2$) производится при переключении блок-контактов *К*, контролирующих положение объекта сигнализации. На *ПУ* в блоке сигнализации $С_1$ срабатывают выходные элементы сигнализации, соответствующие приему импульсов с активным значением импульсного признака, и включают сигнальные лампы *ЛС*. Следует заметить, что в цикле передачи телесигнализации, вызванной изменением состояния одного из контролируемых объектов, сигнализируется состояние не только этого, но и всех остальных объектов. Но все сигналы, кроме одного, не несут информации и, следовательно, создают избыточность. Линейные узлы $Л_1$, $Л_2$ служат для разделения местных и линейных цепей; кроме того, в них усиливаются и формируются принимаемые импульсы.

Комбинационные системы в значительной мере повторяют структуру и порядок передачи сигналов распределительных систем, но дополняются шифраторами *ШУ*, *ШС* и дешифраторами *ДШУ* и *ДШС* в трактах передачи и приема команд и извещений (рис. 49,*б*).

В последние годы выполнен ряд систем телеуправления *с циклической передачей сигналов*. В таких системах применяются бесконтактные элементы, что и делает возможной непрерывную работу устройств, так как срок жизни бесконтактных элементов практически не зависит от числа срабатываний их. Эти системы обычно имеют распределительное (прямое) избирание.

В простейших системах телеуправления с циклической передачей сигнала, рассчитанных на сравнительно небольшие расстояния передачи, передающий и приемный распределители синхронизируются общей сетью электроснабжения переменного тока промышленной частоты: переключения происходят 1 или 2 раза за период. Упрощенная блок-схема такой системы одностороннего действия и диаграмма импульсов в линии представлены на рис. 50,*а* и *б*. Диаграмма составлена применительно к посылке команды № 2.

Передающий распределитель $Р_{I}$ выполнен по кольцевой схеме и работает непрерывно, совершая один шаг за полупериод питающего тока. Приемный распределитель $Р_{II}$ соединен по схеме разомкнутого кольца и останавливается после n шагов. Повторный цикл переключения распределителя $Р_{II}$ начинается после приема синхронизирующего (стартового) импульса *С* (рис. 44,*б*), посылаемого в начале цикла переключений распределителя $Р_{I}$. Синхронизирующий импульс отличается от остальных импульсов (в данном случае — полярностью). На приемной стороне синхронизирующий импульс выделяется различителем *РСИ*. Таким образом, нарушение синхронного переключения распределителей корректируется после каждого цикла. Передача сигналов управления производится по принципу наличия или отсутствия очередного импульса в линии.

В данном случае (посылка команды № 2) в линию поступает только импульс *2*. В приемном устройстве срабатывание индивидуального элемента управления (P_1, P_2 ...) происходит при совпадении во времени импульса от соответствующей ячейки распределителя P_{II} с поступающим из линии сигналом.

Рассмотренная схема (рис. 50,*а*) предназначена лишь иллюстрировать основной принцип действия подобных устройств и не содержит ряда существенных узлов, обеспечивающих необходимую помехоустойчивость системы телеуправления.

Расстояние передачи для таких систем ограничивается наличием общей сихронизирующей сети электроснабжения, а также стабильностью угла сдвига фаз между напряжениями питания передающего и приемного устройств. Надежное действие системы обеспечивается при разности фаз не более $\pm(45 \div 90)°$.

Более универсальны устройства циклического действия с местными генераторами импульсов и циклической синхронизацией (рис. 50,*в*). Частоты генераторов $Г_1$ и $Г_2$ выбираются приблизительно одинаковыми. Синхронизация генератора $Г_2$ осуществляется 1 раз за цикл синхронизирующим импульсом. Стабильность частот генераторов должна быть достаточно высока, чтобы разность фаз колебаний генераторов $Г_1$ и $Г_2$ не превышала допустимых долей периода.

Рассмотренные выше устройства циклического действия рассчитаны на обслуживание объектов управления и контроля, сосредоточенных в одном пункте. Очевидно, что принцип циклического повторения передач может быть распространен и на случай размещения объектов в нескольких пунктах. На рис. 51 представлена структурная схема одного из возможных, наиболее простых вариантов такой системы применительно к цепочечной структуре линии связи.

Распределитель P_0 пункта управления *ПУ* рассчитан на полное число контролируемых объектов (суммарное для всех исполнительных пунктов), тогда как число ячеек распределителя на каждом исполнительном пункте *ИП* равно числу размещенных здесь объектов. Осуществляется циклическая синхронизация распределителей. Для этого распределитель P_0 включен по кольцевой схеме, а распределители P_I, P_{II}, ..., P_N — по разомкнутой. Распределитель P_I запускается стартовым импульсом с *ПУ*, а распределители остальных *ИП* — стартовыми импульсами, поступающими с предыдущих *ИП*. Таким образом, в течение цикла переключений распределителя P_0 последовательно устанавливается связь со всеми *ИП*. Циклы периодически повторяются.

Общий недостаток циклических систем — информационная избыточность (передача сигналов независимо от наличия информации) — в такой системе проявляется наиболее рельефно. При большом суммарном числе объектов длительность цикла недопустимо возрастает. Это приводит также к снижению помехоустойчивости, так как с увеличением числа элементов сигнала вероятность искажения возрастает. Низка и надежность системы, поскольку повреждение любого из устройств *ИП* приводит к нарушению работы всей системы.

Более рациональный метод выполнения системы телеуправления — телесигнализации реализован в системе, рассчитанной на наиболее общий случай соединения *ПУ* с *ИП* линиями связи древовидной структуры. Способ передачи сигналов сочетает автомати-

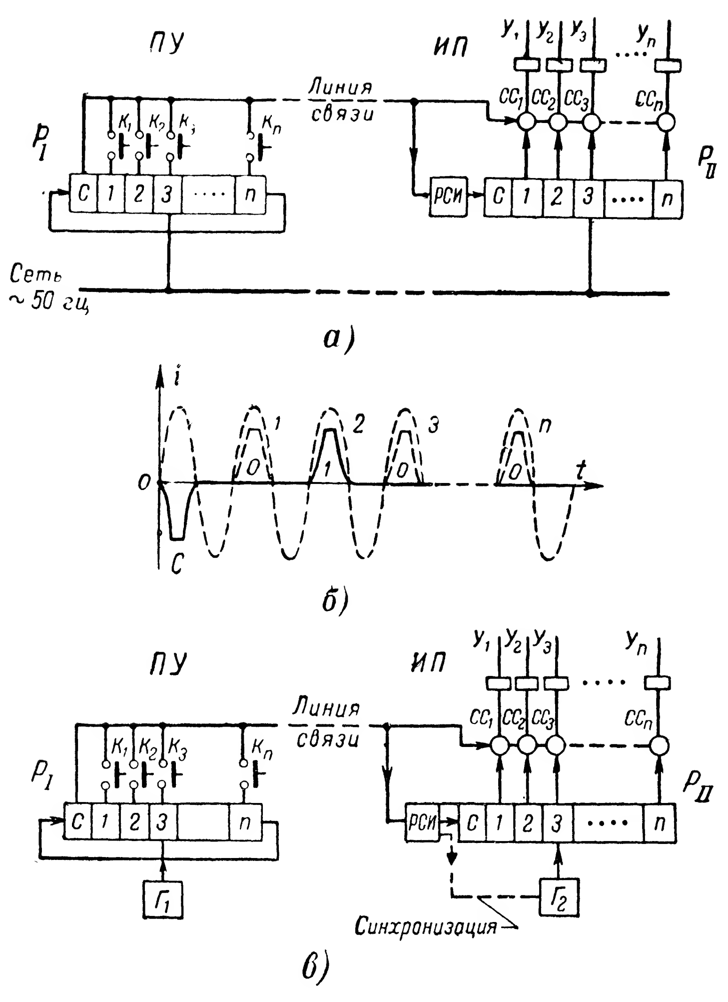


Рис. 50. Циклические системы телеуправления.

а — упрощенная блок-схема системы с синхронизацией общей сетью; *б* — диаграмма импульсов в линии связи; *в* — упрощенная блок-схема системы с местными генераторами импульсов; P_I, P_{II} — распределители; K_1, K_2 ... — командные ключи; CC_1, CC_2 ... — схемы совпадения; P_1, P_2 ... — исполнительные реле команд; *РСИ* — различитель синхронизирующего импульса; $Г_1$, $Г_2$ — генераторы импульсов.

ский циклический опрос исполнительных пунктов с эпизодической передачей информации при возникновении ее; при передаче команды с *ПУ* на какой-либо *ИП* устанавливается связь только с данным *ИП*. Структура такой системы показана на рис. 52.

Распределитель, устанавливаемый на *ПУ* (аналогично и распределители на каждом из *ИП*) состоит из двух частей: адресной $P_а$ и объектной $P_о$. В режиме циклического опроса исполнительных пунктов действует адресная часть распределителей ($P_а$) и с *ПУ* поступают импульсы опроса *ИП* о наличии информации; если

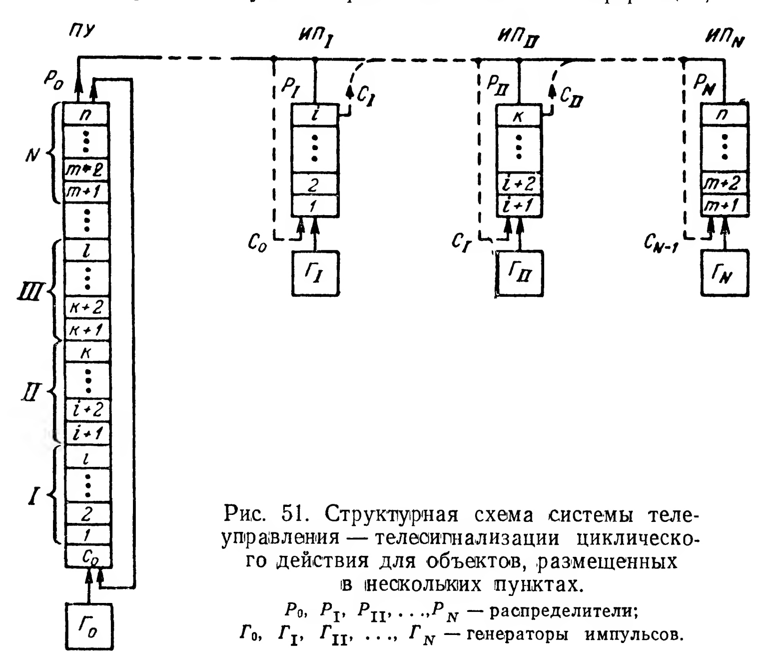


Рис. 51. Структурная схема системы телеуправления — телесигнализации циклического действия для объектов, размещенных в нескольких пунктах.

P_0, P_I, P_{II}, ..., P_N — распределители; $Г_0$, $Г_I$, $Г_{II}$, ..., $Г_N$ — генераторы импульсов.

информация на *ИП* отсутствует, с него поступает ответный импульс. При возникновении информации на одном из пунктов ответный импульс не передается, цикл опроса прерывается; на *ПУ* и на этом ИП присоединяется переключателем *К* объектная часть распределителя ($P_о$) и передаются сигналы о состоянии контролируемого объекта. Затем цикл опроса *ИП* продолжается.

Такой способ передачи сигналов обеспечивает повышение быстродействия системы и ее помехоустойчивости по сравнению с системой по схеме на рис. 51. Заметим, что при помощи импульсов опроса и ответных импульсов непрерывно контролируется исправность всех участков линий связи и самих устройств *ИП*, что при древовидной структуре линий связи обычно связано с серьезными трудностями (в особенности в системах с частотным разделением). Применение общего дискретного устройства на *ПУ* значительно сокращает стоимость устанавливаемой аппаратуры.

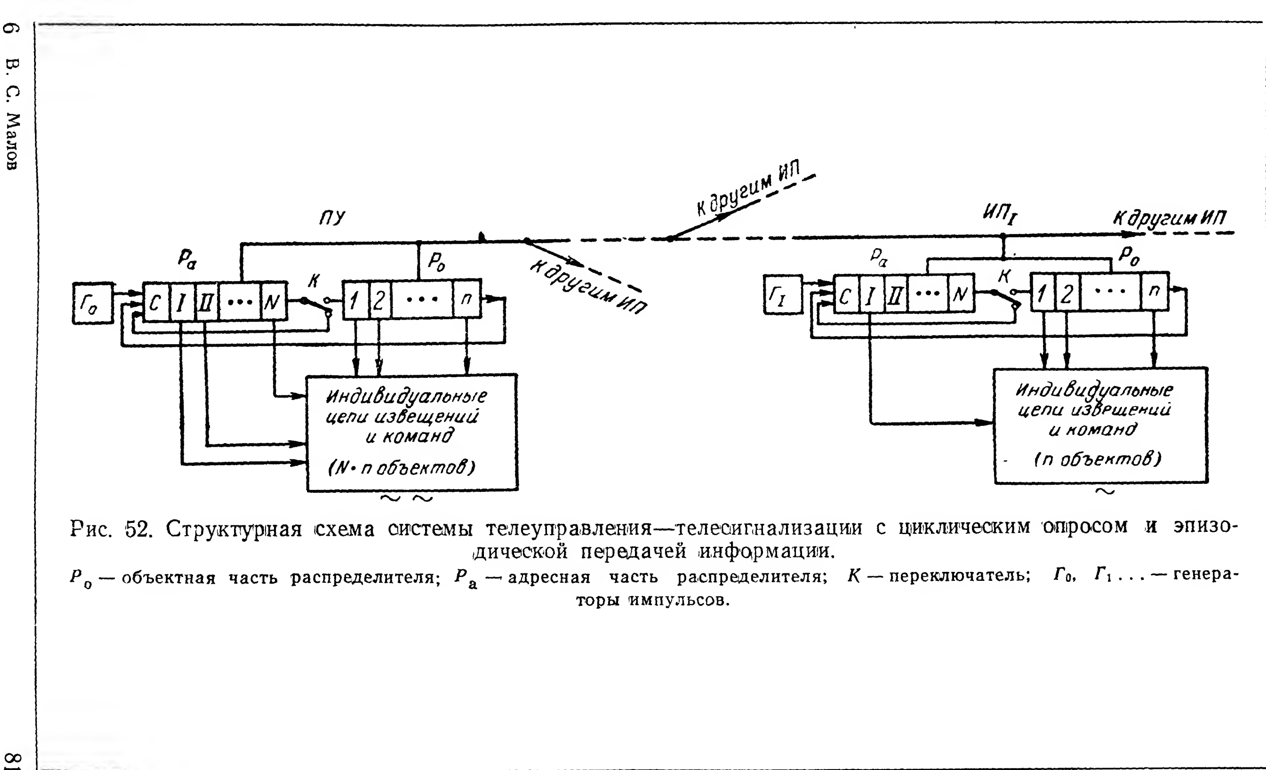


Рис. 52. Структурная схема системы телеуправления—телесигнализации с циклическим опросом и эпизодической передачей информации.

$P_о$ — объектная часть распределителя; $P_а$ — адресная часть распределителя; K — переключатель; $Г_0$, $Г_1$ . . . — генераторы импульсов.

4-6. ЗАЩИТА ОТ ИСПОЛНЕНИЯ ИСКАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Помехоустойчивость системы телеуправления не может быть абсолютной: всегда существует некоторая вероятность неправильной расшифровки сигнала, искаженного помехой; чем выше помехоустойчивость системы, тем меньше эта вероятность. Однако даже малая вероятность исполнения искаженного сигнала нежелательна, так как она может привести к тяжелым последствиям для управляемой установки. Поэтому приемная часть устройств телеуправления снабжается защитными элементами и узлами, предназначенными повысить помехоустойчивость системы. Очевидно, что защитные действия ограничены лишь реализацией возможностей, заложенных в самой структуре сигналов.

За исключением систем приема кодов с коррекцией искажений, защиты строятся на принципе запрета выполнения искаженных сигналов.

При комплектных сигналах чаще применяется числовая защита, основанная на подсчете числа элементов сигнала. В системах с временным разделением такая защита одновременно контролирует синхронность переключения распределителей в течение цикла.

В комбинационных системах с кодами с обнаружением ошибки функции защиты выполняет дешифратор. При этом для реализации защитных свойств кода цепи выбора дешифратора должны реагировать как на активные («1»), так и на пассивные («0») значения импульсного признака всех элементов кода. Так, например, при контактной схеме дешифратора цепь выбора для данного кода составляется последовательным соединением нормально закрытых контактов, соответствующих «нулям», и нормально открытых контактов для «единиц».

В некоторых системах (в частности, в системах с частотным разделением) передача пассивных элементов сигнала, как правило, не производится. В этом случае правильность приема сигнала контролируется подсчетом числа принятых элементов сигнала («единиц»), что возможно при кодах типа C_n^k и некоторых других.

Наряду с упомянутыми здесь наиболее общими методами применяются и многие другие способы защиты, основанные на использовании особенностей конкретных структур сигналов.

Глава пятая

КОМБИНИРОВАННЫЕ И КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

В последние годы в связи с развитием централизованного управления крупными производственными комплексами значительно повысились требования к телемеханическим средствам передачи информации.

При увеличении потоков информации, которыми обмениваются пункт управления и исполнительные пункты, приобрела важное значение проблема повышения эффективности системы передачи ин-

формации, т. е. полного использования пропускной способности линии связи. Наряду с этим возникла задача рационализации обработки передаваемой информации, с тем чтобы максимально разгрузить оператора, управляющего производственными процессами.

Применение в системах автоматического управления производственными процессами управляющих вычислительных машин, а также внедрение универсальных цифровых вычислительных машин для обработки информации о ходе производства требуют приспособить телемеханические системы для автоматического ввода данных в вычислительные машины.

Все это заставило пересмотреть способы выполнения средств телемеханики.

5-1. КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Первым этапом явилось создание комбинированных телемеханических систем, выполняющих функции передачи как непрерывных сообщений (телеизмерение), так и дискретных (телесигнализация и телеуправление) по общей линии связи.

Пример выполнения комбинированной телемеханической системы представлен блок-схемой на рис. 53,*а*. В этой системе применено временно́е разделение; система действует циклически. Часть ячеек распределителей (1, ..., m) предназначена для передачи дискретных известительных сигналов, а остальные ячейки ($m+1$, ..., n) — для передачи измерений. Для передачи команд используются все ячейки (сигналы телеуправления передаются импульсами обратной полярности). В части телесигнализации и телеуправления система действует аналогично системе на рис. 50,*в* и дополнительных пояснений не требует. В части телеизмерения она подобна многоканальной системе с временны́м разделением и индивидуальными модуляторами и демодуляторами по рис. 33,*б*; здесь применена широтно-импульсная модуляция.

Диаграмма сигнала показана на рис. 53,*б*.

Подобного рода комбинированные системы с временны́м разделением выполняются и с применением дискретных сигналов для передачи измерений. В этом случае система снабжается кодирующим и декодирующим устройствами (см. § 3-3), для каждого измерения отводится число ячеек распределителя, равное числу разрядов кода. Заметим, что в такой системе условия передачи дискретных и непрерывных сообщений аналогичны, так как по линии связи циркулируют только дискретные сигналы.

5-2. КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ

Комбинированные системы по существу представляют собой объединение в общем устройстве аппаратуры телеуправления — телесигнализации и многоканальной аппаратуры телеизмерения. Такое решение позволяет передавать системы по одной общей линии связи и дает известное сокращение необходимой аппаратуры.

Более специфичны комплексные телемеханические системы. Такие системы отличаются от комбинированных некоторыми функциями автоматической обработки передаваемой информации и рационализацией ввода и вывода информации (включая автоматический обмен информацией с цифровой вычислительной машиной).

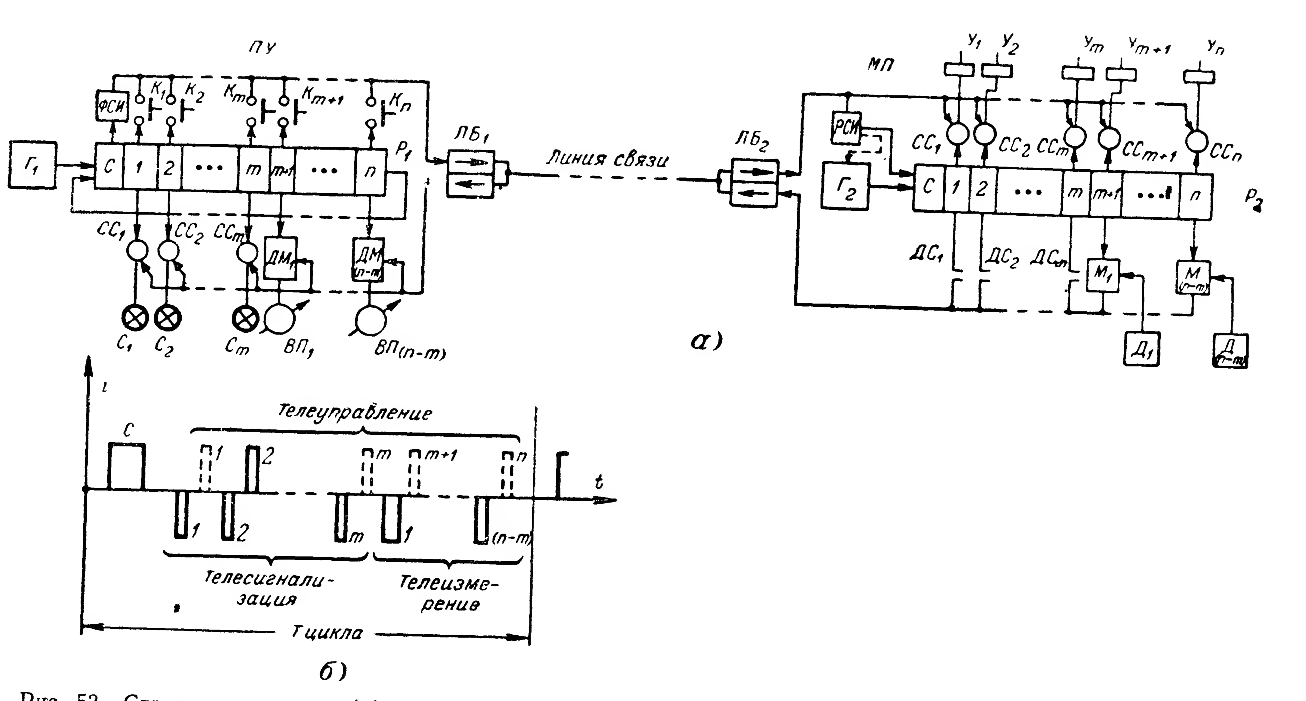


Рис. 53. Структурная схема (*а*) и диаграмма сигнала (*б*) комбинированной телемеханической системы.

P_1, P_2 — распределители; $Г_1$, $Г_2$ — генераторы импульсов; *СС* — схемы совпадения; *ФСИ* — формирователь синхронизирующего импульса; *РСИ* — различитель синхронизирующего импульса; $ЛБ_1$, $ЛБ_2$ — линейные блоки; K_1, K_2 ... — ключи телеуправления; $У_1$, $У_2$ ... — исполнительные реле команд; $ДС_1$, $ДС_2$ ... — датчики телесигнализации; C_1, C_2 ... — индикаторы телесигнализации; $Д_1, \ldots, Д_{(n-m)}$ — датчики измерения; $M_1, \ldots, M_{(n-m)}$ — широтно-импульсные модуляторы; $ДМ_1, \ldots, ДМ_{(n-m)}$ — демодуляторы; $ВП_1, \ldots, ВП_{(n-m)}$ — выходные приборы.

Обычно комплексные системы рассчитываются на обслуживание группы исполнительных пунктов, соединяемых с пунктом управления линиями связи радиальной или произвольной структуры.

К числу простейших функций обработки информации относятся, в частности, следующие: а) выявление отклонений контролируемых параметров от уставок, фиксирующих выход их из зоны нормальных значений; отклонения сигнализируются, а часто и регистрируются; б) логическое сопоставление двух или более дискретных сообщений, включая очередность их поступления; в) алгебраическое суммирование нескольких величин.

В тех случаях, когда комплексная телемеханическая система работает совместно с цифровой вычислительной машиной (универсальной или специализированной), последняя выполняет такие математические операции обработки информации, как усреднение замеров непрерывных величин за определенный промежуток времени и интегрирование их по времени, а также вычисление по результатам замеров нескольких косвенных и обобщенных показателей (например, к. п. д.), характеризующих ход производственного процесса.

Функции обработки данных, а также автоматический обмен информацией с цифровой вычислительной машиной выполняются наиболее эффективно, если данные в телемеханической системе выводятся в цифровой форме; весьма ценным при этом является удобство осуществления «памяти». Вместе с тем при цифровом воспроизведении легко выполняется и компактная многоканальная цифровая регистрация данных.

Цифровая форма воспроизведения органически связана с передачей значений контролируемых величин кодовыми сигналами. Однако в ряде случаев целесообразнее передавать информацию непрерывными сигналами, выполняя преобразование последних в цифровую форму на приемном конце телемеханической системы (на пункте управления). Такому решению, в частности, часто отдается предпочтение при небольших длинах линий связи и низком уровне помех, так как существенно сокращается общее количество устанавливаемой аппаратуры.

Рассмотрим принципы выполнения комплексных телемеханических систем на примерах двух обобщенных структурных схем. В первой из этих схем (рис. 54) значения измеряемых величин передаются по линии связи модулированными время-импульсными сигналами, а во второй (рис. 55) — кодо-импульсными сигналами. Кроме того, в обеих системах предусмотрена передача дискретных извещений и команд. В целях упрощения схем узлы сигнализации отклонений опущены.

Рассмотрим схему на рис. 54. На пункте управления *ПУ* и исполнительном пункте *ИП* установлены бесконтактные распределители *Р′* и *Р″*. Распределителями *ПУ* управляет генератор $ГИ_0$, распределителями *ИП* — местный генератор *ГИ*. Синхронизирующий импульс вырабатывается на *ПУ* в формирователе *ФСИ* и выделяется на *ИП* различителем *РСИ*. Распределители *Р′* задают последовательность передачи контрольной информации (с *ИП* на *ПУ*), а распределители *Р″* — команд (с *ПУ* на *ИП*).

На *ИП* контролируемые параметры, представленные сигналами датчиков *Д*, управляют время-импульсными модуляторами *М*. Датчики известительных сигналов *ДС* коммутируют соответствующие тактовые импульсы.

Поскольку распределители P' всех *ИП* работают синхронно, сигналы со всех *ИП* одновременно поступают по линиям связи на *ПУ*. Но *ПУ* на данном цикле переключения распределителей принимает сигналы только с одного *ИП*. Подключение этого *ИП* для приема сигналов осуществляется на *ПУ* при помощи ключей $K'_1, \ldots, K'_N$. Этими ключами управляет программное устройство *П*. В зависимости от выбранной программы может происходить как циклическое, так и выборочное подключение *ИП*. В первом случае последовательность переключений устанавливается распределителем пунктов *РП*.

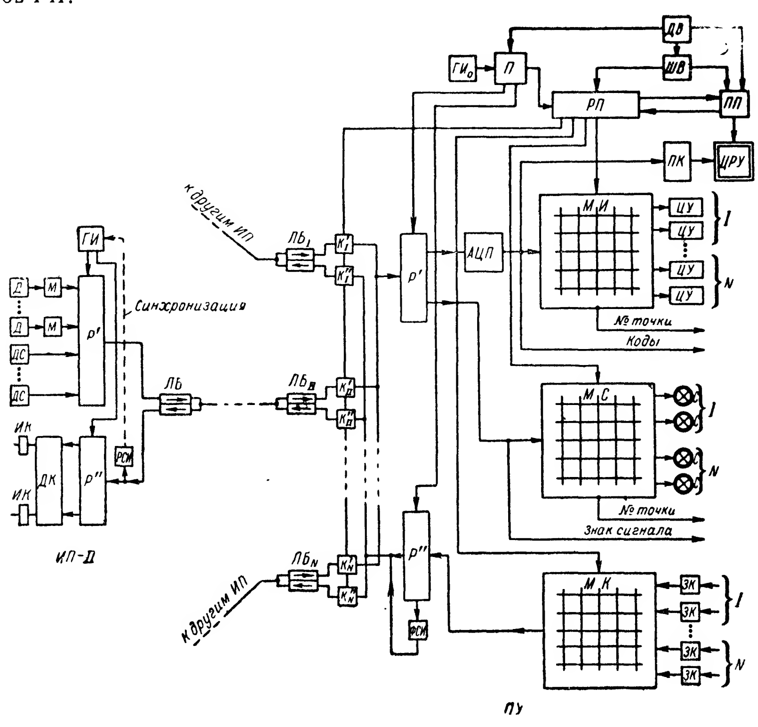


Рис. 54. Упрощенная структурная схема комплексной телемеханической системы с передачей измеряемых величин модулированными сигналами.

P' и P'' — распределители; *РП* — распределитель пунктов; *ГИ* — генераторы импульсов; *ФСИ* — формирователь синхронизирующего импульса; *РСИ* — различитель синхронизирующего импульса; *ЛБ* — линейные блоки; *К* — ключи переключения линий связи; *П* — программное устройство; *АЦП* — аналого-цифровой преобразователь; *МИ* — матрица-дешифратор кодов измеряемых величин; *МС* — матрица-дешифратор дискретных известительных сигналов; *МК* — матрица-шифратор команд; *ДК* — дешифратор команд; *ЦРУ* — цифровое регистрирующее устройство; *ПП* — устройство программы печати; *ДВ* — датчик времени; *ПК* — преобразователь кодов; *ШВ* — шифратор сигналов времени; *Д* — датчики измеряемой величины; *М* — время-импульсные модуляторы; *ДС* — датчики сигнализации; *ЦУ* — цифровые индикаторы; *С* — индикаторы сигнализации; *ЗК* — задатчики команд; *ИК* — исполнительные органы команд.

Вывод информации осуществляется при помощи матриц-дешифраторов *МИ* и *МС*. Время-импульсные сигналы контролируемых параметров от ячеек распределителя *Р'*, установленного на *ПУ*, поступают на вход аналого-цифрового преобразователя *АЦП*. В *АЦП* время-импульсные сигналы преобразуются в параллельные двоично-десятичные (или двоичные) коды (принципы построения таких преобразователей были рассмотрены в § 3-3). При помощи *МИ* двоично-десятичные коды преобразуются в десятичные, которые последовательно выводятся на индивидуальные цифровые индикаторы *ЦУ*. Одновременно коды с выхода *АЦП* посылаются на вход цифровой вычислительной машины. Вместе с кодом сигнала передается адресный сигнал, указывающий номер контролируемого параметра (точки). Цифровая регистрация производится через заданные промежутки времени (датчик времени *ДВ*). Последовательность печати параметров в цифровом регистрирующем устройстве *ЦРУ* устанавливается программным устройством *П* и распределителем пунктов *РП*. Непосредственное управление *ЦРУ* осуществляется устройством программирования печати *ПП*. Как и при выводе данных на цифровые индикаторы, код с выхода *АЦП*, прежде чем поступить в *ЦРУ*, переводится в десятичную форму преобразователем *ПК*. Данные времени (часы, минуты) вводятся в *ЦРУ* в десятичной форме при помощи шифратора времени *ШВ*. Отклонения сигнализируются при сравнении цифровых кодов, снимаемых с матрицы *МИ* и с поля уставок (на схеме на рис. 54 эти узлы не показаны).

Дискретные известительные сигналы датчиков сигнализации *ДС* (передаваемые с *ИП*) поступают в *ПУ* на матрицу-дешифратор *МС* и затем на индивидуальные индикаторы сигнализации *С*. Одновременно сигналы поступают в вычислительную машину (номер контролируемой точки и знак: «1» или «0»). Команды с *ПУ*, задаваемые вручную или поступающие с вычислительной машины, коммутируются матрицей-шифратором команд *МК* и в заданной последовательности, определяемой программой работы, через распределитель P'' и ключи K''_1, ..., K''_N передаются на соответствующие *ИП*. Здесь команды дешифруются (P'', *ДК*) и исполняются (*ИК*).

В системе по схеме на рис. 55 непрерывные сигналы преобразуются в коды на *ИП*. Устройство каждого *ИП* дополняется аналого-цифровым преобразователем *АЦП*, а на *ПУ* на вход *МС* поступают коды с линий связи. В остальном структура системы по рис. 55 сходна со структурой системы по рис. 54.

Сопоставляя структуры описанных двух систем, нужно отметить, что общее число элементов аппаратуры в системе по рис. 55 существенно больше, чем в системе по рис. 54, так как аналого-цифровые преобразователи, устанавливаемые на каждом *ИП*, содержат большое число элементов. С другой стороны, при передаче кодов увеличивается число ячеек распределителей *Р'*, используемых для передачи непрерывных сообщений (число ячеек на каждый контролируемый параметр равно числу разрядов кода).

Описанные здесь схемы имеют в основном иллюстративный характер и поясняют основные особенности построения комплексных телемеханических систем. Реальные схемы таких систем могут существенно отличаться от рассмотренных; в ряде случаев они дополняются узлами и блоками для выполнения других функций, перечисленных в начале параграфа. Более подробное рассмотрение схем комплексных телемеханических систем выходит за рамки этой книги.

В комплексных системах, как было отмечено, сбор, передача и частично обработка информации централизуются, так что значительно увеличивается общее количество информации, пропускаемое системой в единицу времени. Поэтому требования к надежности таких систем резко возрастают, особенно в системах автоматического обмена информацией между объектами управления и управляющей вычислительной машиной. В комплексных телемеханических

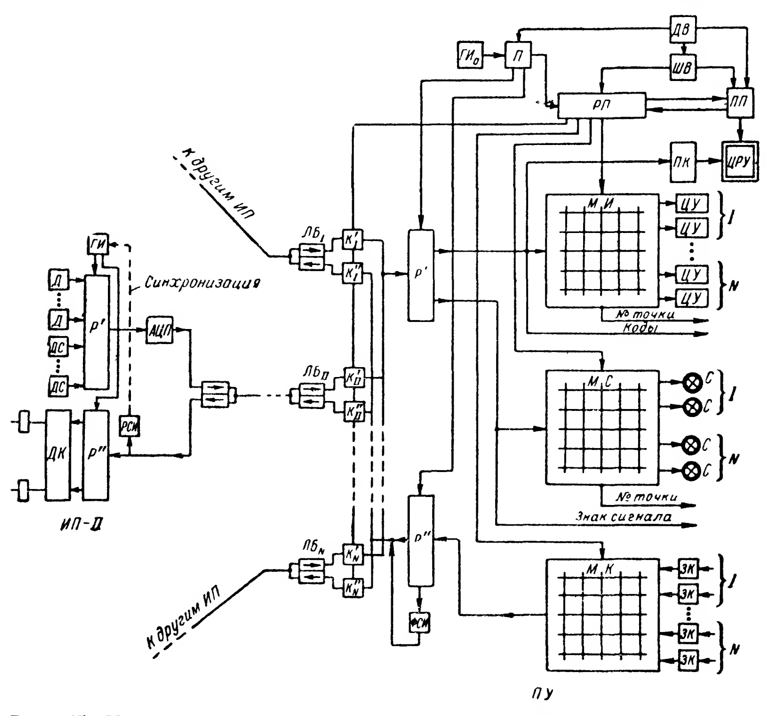


Рис. 55. Упрощенная структурная схема комплексной телемеханической системы с передачей измеряемых величин импульсными кодами. (Обозначения см. на рис. 54.)

системах принимается ряд мер для повышения достоверности передаваемой информации. К числу таких мер относятся, в частности, применение кодов с обнаружением искажений, автоматическое повторение сигналов при их искажении, блокировка ввода искаженных сигналов в вычислительную машину и т. п.

В настоящее время число выполненных комплексных телемеханических систем еще невелико. Тем не менее перспективность этого направления развития телемеханики очевидна и можно предполагать, что в недалеком будущем комплексные системы во многих областях промышленности заменят индивидуальные системы телеизмерения и телеуправления — телесигнализации.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ЧАСТОТНЫЕ СПЕКТРЫ НЕКОТОРЫХ СИГНАЛОВ

А. Непериодические сигналы $C(\omega) = \int\limits_0^\infty e^{-j\omega t} u(t)\, dt$

№ п/п.	Сигнал	График сигнала	Модуль спектральной плотности $\lvert C(\omega)\rvert$	График частотного спектра
1	Включение постоянного напряжения $u = U_0$ при $t > 0$	u, U_0, t, 0	$\dfrac{U_0}{\pi\omega}$	$\lvert C(\omega)\rvert$, ω, 0
2	Прямоугольный импульс $u = U_0$ при $0 < t < t_и$	u, U_0, t, 0, $t_и$	$\dfrac{2U_0}{\pi\omega}\left\lvert \sin\dfrac{\omega t_и}{2}\right\rvert$	$\dfrac{U_0 t_и}{\pi}$, $\lvert C(\omega)\rvert$, ω, 0, $\dfrac{2\pi}{t_и}$, $\dfrac{4\pi}{t_и}$, $\dfrac{6\pi}{t_и}$
3	Косинусоидальный импульс $u = U_m \cos\Omega t$ при $-t_{и2}/2 < t < t_{и2}/2$	u, U_m, t, 0, $t_и$	$\dfrac{2U_m t_и}{\pi^2}\left\lvert \dfrac{\cos\omega\dfrac{t_и}{2}}{1-\left(\dfrac{2}{\pi}\omega\dfrac{t_и}{2}\right)^2}\right\rvert$	$\dfrac{2}{\pi^2}U_m t_и$, $\lvert C(\omega)\rvert$, ω, 0, $\dfrac{3\pi}{t_и}$, $\dfrac{5\pi}{t_и}$, $\dfrac{7\pi}{t_и}$

Продолжение приложения

№ п/п.	Сигнал	График сигнала	Модуль спектральной плотности $\lvert C(\omega)\rvert$	График частотного спектра
4	Включение синусоидального напряжения $u = U_m \sin \Omega t$ при $t > 0$		$\dfrac{U_m \Omega}{\lvert \pi(\Omega^2 - \omega^2) \rvert}$	
5	Импульс, составленный из целого числа n синусоид, $u = U_m \sin \Omega t$ при $0 < t < t_и$; $t_и = n \dfrac{2\pi}{\Omega}$		$\dfrac{2U_m \Omega}{\lvert \pi(\Omega^2 - \omega^2) \rvert} \times \left\lvert \sin \pi n \dfrac{\omega}{\Omega} \right\rvert$	

Б. Периодические сигналы

№ п/п.	Сигнал	График сигнала	Составляющие спектра		График частотного спектра
			Постоянная составляющая C_0	Амплитуды гармоник C_k	
1	Последовательность прямоугольных импульсов $t_и \neq \frac{T}{2}$		$U_0 \frac{t_и}{T}$	$\frac{2U_0}{\pi k} \sin \pi k \frac{t_и}{T}$ ($k = 1, 2, 3 \ldots$)	$\frac{t_и}{T} = \frac{1}{5}$
2	То же $t_и = \frac{T}{2}$		$\frac{U_0}{2}$	$\frac{2U_0}{\pi k}$ ($k = 1, 3, 5 \ldots$)	

Продолжение приложения

№ п/п.	Сигнал	График сигнала	Составляющие спектра		График частотного спектра
			Постоянная составляющая C_0	Амплитуды гармоник C_k	
3	Последовательность косинусоидальных импульсов; $u = U_m \cos \Omega t$ во время импульса	u, 0, t, U_m, $\frac{T}{2}$, T	$\frac{U_m}{\pi}$	а) $\frac{U_m}{2}$ $(k = 1)$ б) $\frac{2U_m}{\pi(k-1)(k+1)}$ $(k = 2,\ 4,\ 6\ldots)$	$0{,}5U_0$, 0, Ω, 2Ω, 4Ω, 6Ω, ω
4	Последовательность импульсов, составленных из целого числа синусоид; $u = U_m \sin \Omega t$ во время импульса $t_и \neq \frac{T}{2}$	u, 0, t, U_m, $t_и$, T	—	а) $U_m \frac{t_и}{T}$ $(\omega = \Omega)$ б) $\frac{U_m}{\pi k} \sin \pi k \frac{t_и}{T}$ $\left(\omega = \Omega \pm \frac{2\pi k}{T}\right)$ $(k = 1,\ 2,\ 3\ldots)$	$\frac{t_и}{T} = \frac{1}{5}$, $0{,}5U_m$, $\Omega-\frac{12\pi}{T}$, $\Omega-\frac{8\pi}{T}$, $\Omega-\frac{4\pi}{T}$, Ω, $\Omega+\frac{4\pi}{T}$, $\Omega+\frac{8\pi}{T}$, $\Omega+\frac{12\pi}{T}$, ω

№ п/п.	Сигнал	График сигнала	Составляющие спектр		График частотного спектра
			Постоянная составляющая C_0	Амплитуды гармоник C_k	
5	То же $t_и = \frac{T}{2}$		—	а) $\frac{U_m}{2}$ $(\omega = \Omega)$ б) $\frac{U_m}{\pi k}; \left(\omega = \Omega \pm \frac{2\pi k}{T}\right)$ $(k = 1,\ 3,\ 5\ \ldots)$	

В. Модулированные (квазипериодические) сигналы

№ п/п.	Сигнал	График сигнала	Амплитуды частотных составляющих	График частотного спектра
1	Синусоидальное колебание частоты ω_0, модулированное по амплитуде синусоидальным колебанием частоты Ω $u = U_m(1 + m \sin \Omega t) \times \sin \omega_0 t$		а) U_m $(\omega = \omega_0)$ б) $\frac{m}{2} U_m$ $(\omega = \omega_0 \pm \Omega)$ m — коэффициент модуляции	

Продолжение приложения

№ п/п.	Сигнал	График сигнала	Амплитуды частотных составляющих	График частотного спектра
2	Синусоидальное колебание частоты ω_0, модулированное по частоте синусоидальным колебанием частоты Ω $u = U_m \times$ $\times \sin(\omega_0 t + \beta \cos \Omega t)$		а) $U_m J_0(\beta)$ $(\omega = \omega_0)$ б) $U_m J_k(\beta)$ $(\omega = \omega_0 \pm k\Omega)$ $(k = 1, 2, 3 \ldots)$ $\beta = \frac{\Delta\omega_0}{\Omega}$ — индекс модуляции; $\Delta\omega_0$ — девиация частоты; $J_k(\beta)$ — функция Бесселя k-го порядка	

ЛИТЕРАТУРА

1. Щукин Б. К., Основы техники телеуправления, Госэнергоиздат, 1946.

2. Сифоров В. И., Дробов С. А., Ширман Я. Д., Железнов Н. А., Теория импульсной радиосвязи, издание ЛК ВВИА, 1951.

3. Гольдман С., Гармонический анализ, модуляция и шумы, Изд-во иностранной литературы, 1951.

4. Харкевич А. А., Спектры и анализ, Гостехиздат, 1957.

5. Жданов Г. М., Телеизмерение, Госэнергоиздат, ч. I, 1952; ч. II, 1953.

6. Харкевич А. А., Очерки общей теории связи, Гостехтеориздат, 1955.

7. Малов В. С., Телемеханика в энергетических системах (второе издание), Госэнергоиздат, 1955.

8. Телемеханизация в народном хозяйстве, Сборник, Изд-во АН СССР, 1956.

9. Мюллер Ф., Телеуправление, Изд-во иностранной литературы, 1957.

10. Гольдман С., Теория информации, Изд-во иностранной литературы, 1957.

11. Никольс М. Х., Раух Л. Л., Радиотелеметрия, Изд-во иностранной литературы, 1958.

12. Фремке А. В., Телеизмерения, Госэнергоиздат, 1958.

13. Теория информации и ее приложения, Сборник переводов, Физматиздат, 1959.

14. Гинзбург С. А., Лехтман И. Я., Малов В. С., Основы автоматики и телемеханики (второе издание), Госэнергоиздат, 1959.

15. Мановцев А. П., Раввин Г. И., Основы телеуправления и телеконтроля, Госэнергоиздат, 1959.

16. Малов В. С., Телемеханика, Госэнергоиздат, 1960.

17. Ильин В. А., Телеконтроль и телеуправление рассредоточенными объектами, Госэнергоиздат, 1963.

18. Васильев Р. Р., Шастова Г. А., Передача телемеханической информации, Госэнергоиздат, 1960.

19. Купершмидт Я. А., Малов В. С., Пшеничников А. М., Современные телеизмерительные системы, Госэнергоиздат, 1961.

20. Мамиконов А. Г., Гешелин М. Г., Телемеханика в нефтяной и газовой промышленности. Гостоптехиздат, 1961.

21. Райнес Р. Л. и Горяинов О. А., Телеуправление, изд-во «Энергия», 1965.

22. Жуховицкий Б. Я., Сигналы телемеханики и их преобразования, Госэнергоиздат, 1963.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 30 коп.